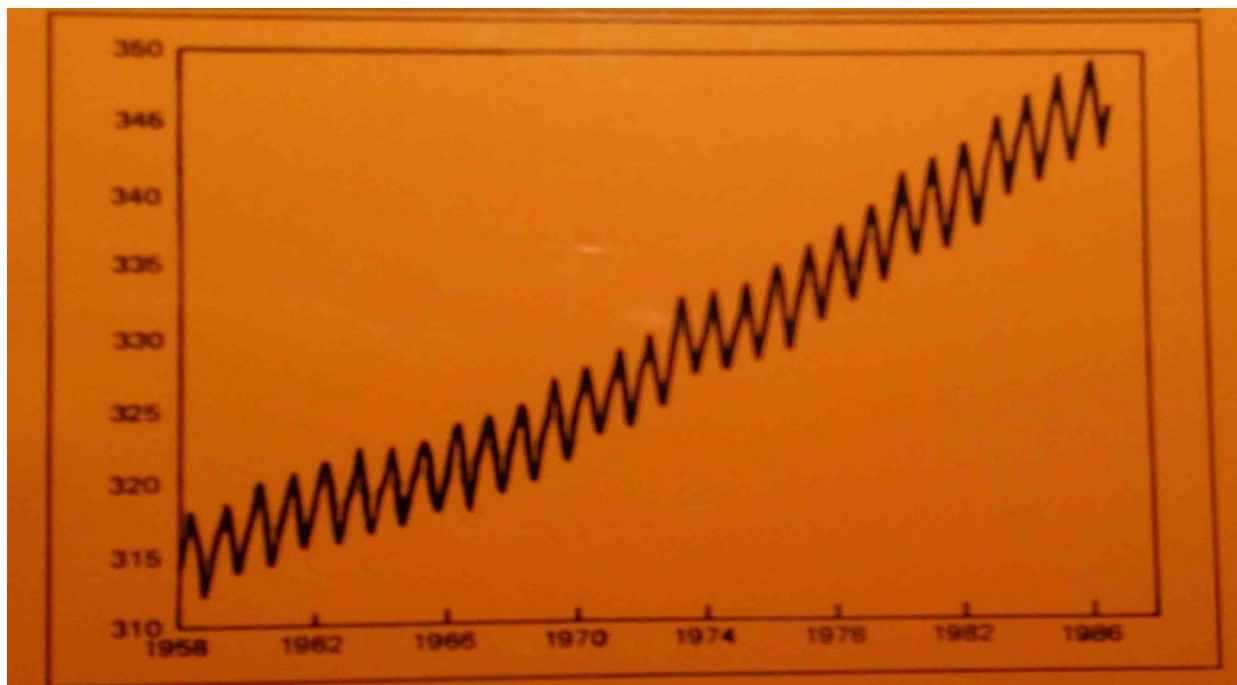


*Faragó T.; Iványi Zs.; Führer E.; Járó Z.; Jászai T.; Kovács G.; Mika J.;  
Nováky B.; Nováky E.; Petrasovits I.; Práger T.; Szalai S., 1990:  
Az éghajlat változékonysága és változása: okok, folyamatok, regionális hatások,  
különös tekintettel a lehetséges társadalmi-gazdasági következményekre,  
a nemzetközi együttműködésből adódó feladatokra<sup>1</sup>  
(szerk.: Faragó T.; Iványi Zs.; Szalai S.).  
KTM – OMSZ, Budapest, 100 o., ISBN 963 7702 350*

## **AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGA ÉS VÁLTOZÁSA:**

**OKOK, FOLYAMATOK, REGIONÁLIS HATÁSOK  
KÜLÖNÖS TEKINTETTEL  
A LEHETSÉGES TÁRSADALMI-GAZDASÁGI KÖVETKEZMÉNYEKRE,  
A NEMZETKÖZI EGYÜTTMŰKÖDÉSBŐL ADÓDÓ FELADATOKRA  
(TÉMAFELTÁRÓ TANULMÁNY)**

**Környezetvédelmi és Területfejlesztési  
Minisztérium, Országos Meteorológiai Szolgálat, 1990**



## **CLIMATE VARIABILITY AND CHANGE:**

**CAUSES, PROCESSES, REGIONAL IMPACTS  
WITH SPECIAL EMPHASIS ON THE SOCIO-ECONOMIC IMPACTS AND  
THE TASKS RELATED TO THE INTERNATIONAL COOPERATION  
Hungarian Ministry for Environment and Regional Policy  
Hungarian Meteorological Service, 1990**

<sup>1</sup> A kiadvány ábrái a nyomtatott változatban találhatók meg.

A címképen  
A Mauna Loa (Hawaii) Obszervatóriumban mért havi széndioxid-||koncentrációk (ppm)

ISBN 963 7702 350

## TARTALOMJEGYZÉK / CONTENTS

ÖSSZEFOGLALÓ	5
English summary	9
BEVEZETŐ / Introduction	13
1. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS VÁLTOZÁSÁNAK OKAI	15
Causes of the climatic variability and change	
1.1. MÚLTBELI ÉGHAJLATVÁLTOZÁSOK / Changes in the past	15
Az átlaghőmérséklet változásai	
A világtengerek szintje	
1.2. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÁSÁNAK TERMÉSZETES ÉS ANTROPOGÉN OKAI	19
Natural and anthropogenic causes of climate change	
Az üvegház-gázok	
A klímaváltozás további külső tényezői	
2. A GLOBÁLIS ÉGHAJLATI RENDSZER ÉS A REGIONÁLIS ÉGHAJLAT SZÁMSZERŰ VIZSGÁLATÁNAK MÓDSZEREI, AZ ÉGHAJLAT MODELLEZÉSE	25
Methods of analysis of the global climate system and the regional climates, climate modelling	
2.1. AZ ÉGHAJLAT MEGFIGYELÉSE / Climate monitoring	25
Közvetett észlelések	
Közvetlen mérések: klimatológiai megfigyelések és az éghajlatváltozás megfigyelési követelményei	
A légkör összetétele és az éghajlati rendszer	
2.2. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS VÁLTOZÁSÁNAK EMPIRIKUS ÉS STATISZTIKAI VIZSGÁLATA	27
Empirical and statistical methods of investigation of climate variability and change	
Az éghajlat fogalma és a változások spektruma	
Az éghajlatváltozás detektálása	
Az éghajlati szimulációk, scenáriók	
Globális és regionális változások	
2.3. AZ ÉGHAJLAT MODELLEZÉSE ÉS A MODELLEK ALKALMAZÁSÁNAK MÓDSZERTANI KÉRDÉSEI	31
Climate models and methodological problems of their use	
AZ ÉGHAJLAT ELŐREJELEZHETŐSÉGE	
AZ ÉGHAJLATI MODELLEK	
A klímamodellek tulajdonságai	
Az éghajlati modellek hierarchiája	
A modellek tér- és időbeli skála szerinti osztályozása	
Az éghajlati rendszer modelljei	
A modellekben alkalmazott matematikai módszerek	
A modellek geometriai szabadsági fokai	
VISSZACSATOLÁSI MECHANIZMUSOK	
AZ ÉGHAJLATI MODELLEK ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI	
A havi átlagok numerikus előrejelzése	
A kisfrekvenciás változékonyság modellezése	
Érzékenységvizsgálatok	
Az éghajlati scenáriók vizsgálata	
2.4. AZ ÉGHAJLAT JÖVŐJE / Future of the climate	41

3. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS VÁLTOZÁSÁNAK GLOBÁLIS ÉS REGIONÁLIS HATÁSAI	44
Global and regional impacts of the climate variability and change	
3.1. A HATÁSOK ÁLTALÁNOS ÁTTEKINTÉSE ÉS A HATÁSOK VIZSGÁLATÁNAK MÓDSZERTANI KÉRDÉSEI	44
General problems of the impact analysis	
3.2. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS FELTÉTELEZETT VÁLTOZÁSÁNAK HATÁSA A VÍZJÁRÁSRA ÉS A VÍZGAZDÁLKODÁSRA	48
Implications of the climate variability and change on the water resources and the water management	
A HAZAI VÍZJÁRÁS HOSSZÚ IDEJŰ VÁLTOZÁSAI Hegy- és dombvidéki lefolyás Síkvidéki területek lefolyása A VÍZJÁRÁS ÉS A VÍZGAZDÁLKODÁS HATÁSVIZSGÁLATAI	
3.3. A NÖVÉNYTERMESZTÉS ÉGHAJLATI FELTÉTELEI, AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS LEHETSÉGES REGIONÁLIS AGROMETEOROLÓGIAI KÖVETKEZMÉNYEI	56
Climatic conditions of the plant cultivation; possible regional agrometeorological consequences of the climate change Az éghajlat változékonysága és mezőgazdasági hatásai Az éghajlatváltozás regionális szcenáriói a növénytermesztés szempontjából Felkészülés, alkalmazkodás, mezőgazdasági politika	
3.4. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS FELTÉTELEZETT VÁLTOZÁSÁNAK HATÁSA AZ ERDŐÁLLOMÁNYOKRA, AZ ERDŐGAZDÁLKODÁSRA	63
Impact of the climate variability and its potential change on the forests and the forest management Az éghajlat és az erdőtársulás változása a múltban Az időjárás és a főbb erdőalkotó fafajok növekedése közötti összefüggés Az éghajlat és az erdőtársulások elterjedése Erdészeti klímaosztályozás Fafajmegválasztás, fafajpolitika A szénkörforgalom és az erdő kapcsolata	
3.5. ENERGIA ÉS KLÍMA / Energy and climate	69
Éghajlati hatások Az energiatermelés és fogyasztás hatása a levegőkörnyezetre és az éghajlatra Középtávú energiapolitika hazánkban és annak környezeti, környezetvédelmi szempontjai	
3.6. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS FELTÉTELEZETT VÁLTOZÁSÁNAK TÁRSADALMI-GAZDASÁGI ÖSSZEFÜGGÉSEI	74
Socio-economic aspects of the climate variability and change Általános koncepcionális kérdések Az éghajlatingadozás és a globális éghajlat változás néhány társadalmi-gazdasági vetülete A társadalmi-gazdasági fejlődés és a környezeti, éghajlati problémák megjelenése Az éghajlat és a társadalmi-gazdasági folyamatok összefüggései Az éghajlat és a társadalom interaktív kapcsolata: a vizsgálatok módszertani kérdései	
4. NEMZETKÖZI EGYÜTTMŰKÖDÉS / The international cooperation	82
A GARP klímadinamikai alprogramja, a globális klímarendszer és a klímaváltozás lehetőségének vizsgálata, 1967-1979 Az Éghajlati Világprogram: az 1979-1988-as időszak A nemzetközi együttműködés jelenlegi időszaka, 1988-1989 A nemzetközi együttműködés hazai vonatkozásai	
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A TOVÁBBI FELADATOK / Conclusions and the further tasks	89
IRODALOM, HIVATKOZÁSOK / References	91

## ÖSSZEFOGLALÓ

A természeti környezet összetevőinek - és ezek sorában az éghajlatnak az - időbeli változásai közvetlenül vagy közvetve hatással vannak a legtöbb társadalmi-gazdasági tevékenységre. Néhány nagytérű és súlyos következményekkel járó éghajlati anomália, illetve egyes légköri nyomgázok koncentrációjában tapasztalt változások ráirányították a figyelmet a földi éghajlat esetleges rövidtávú megváltozásának lehetőségére. Az e témakörben már két évtizede folyó intenzív kutatások kiterjednek a változásokat előidéző okok, az éghajlati rendszerben végbemenő folyamatok és a következmények vizsgálatára. Hazánkban e kutatásokat többek között a Környezetvédelmi Minisztérium és a Magyar Tudományos Akadémia támogatja. E kötet a Környezetvédelmi Minisztérium támogatásával az Országos Meteorológiai Szolgálatnál készült és az éghajlatváltozással kapcsolatos főbb kutatási feladatokat és eddigi eredményeket foglalja össze.

A tanulmány első része az éghajlat változékonyságának és változásának természetes és antropogén okait tekinti át, valamint röviden szól az éghajlatváltozások múltjáról.

A második rész az éghajlat megfigyelési rendszerével és az éghajlat számszerű vizsgálatának módszereivel foglalkozik. Ez utóbbi érinti az empirikus és statisztikai jellegű vizsgálatokat, továbbá az éghajlat előrejelezhetőségének kérdését. Az éghajlati modelleket tárgyaló rész segít eligazodni a különböző modellek hierarchiájában, kiemeli a modellezés módszertani problémáit és utal a modellek alkalmazhatósági korlátaira is. E rész a megfigyelések és numerikus modellkísérletek által nyert eredmények alapján vázolja az éghajlat jövőjére vonatkozó hipotéziseket is.

A harmadik rész foglalkozik a feltételezett éghajlatváltozás lehetséges hatásainak vizsgálatával a vízjárás-vízgazdálkodás, a növénytermesztés, az erdőgazdálkodás és az energiagazdálkodás területén, valamint tárgyalja az éghajlati hatások általános társadalmi-gazdasági összefüggéseit. Az egyes területekre vonatkozó hatástanulmányokat rövid módszertani áttekintés előzi meg. A hatáselemzések részben nemzetközi irodalmi tapasztalatokat foglalnak össze, részben a magyarországi vizsgálatok megkezdéséről, azok első eredményeiről számolnak be.

A hidrológia területén végzett vizsgálatok arra utalnak, hogy vizeink járásában az elmúlt 100-120 év során bekövetkezett nagyobb léptékű változások - például a tiszai árvizek emelkedése, nagyobb tavaink vízszint-ingadozásainak csökkenése, a Duna jégviszonyaiban e században végbemenő változások - döntően az emberi tevékenység következményei. A vízjárási tendenciák eddigi hazai vizsgálatainak alapján azonban nem igazolható, de nem is cáfolható, hogy az elmúlt 100-120 év során az éghajlatban változás következett volna be. A tanulmány összegzi a vízgazdálkodás éghajlati hatástanulmányainak fontosabb eredményeit.

Az éghajlati hatásvizsgálatok bizonytalanságának egyik lényeges forrása az éghajlat-vízjárás múltbeli észlelések alapján feltárt összefüggéseinek stabilitása. Az éghajlati változások a regresszió vagy modell kapcsolatok paramétereire is kihatással vannak. A vízjárás éghajlati hatásvizsgálatai a múltban többnyire csak a felszíni vízfolyásokra és a tavakra terjedtek ki. Hiányoznak a szélsőséges vízjárási jellemzők éghajlati hatásvizsgálatai is. Az átlagos évi lefolyásra és a potenciális vízkészletre vonatkozó vizsgálatok igazolják, hogy az éghajlati elemek (átlagos évi csapadék és évi középhőmérséklet) viszonylag kismértékű megváltozásai a potenciális vízkészlet változásaiban felerősödve jelentkezhetnek.

A mezőgazdaság és ezen belül is a növénytermesztés a leginkább időjárás- és éghajlatfüggő társadalmi-gazdasági tevékenység. Magyarországon az elmúlt évtizedek megfigyelései alapján a terméshozamok változékonyságának mintegy harmada "magyarázható" meteorológiai okokkal. Hazánkban a fény- és hőellátottság lényegében nem korlátozza a növénytermesztést, szemben az éghajlatilag nem kielégítő mértékű és erősen változékonny nedvesség-ellátottsággal. Az éghajlat ingadozása és az ezzel többek között együttjáró évi, évközi vagy hosszabb időskálájú csapadékmennyiség vagy talajnedvesség változás a tápanyaghasznosuláson keresztül is módosíthatja a termésmennyiséget, annak sokévi trendjét és változékonyságát. A különféle időjárás-növény modellek, statisztikai összefüggésvizsgálatok segítségével megállapítható, hogy a legtöbb gazdasági növény esetében az időjárás átlagos termésmenővelő és terméscsökkentő hatása eléri vagy meghaladja a 20%-ot.

A globális éghajlati scénáriókból empirikus-statisztikai módszerekkel Magyarországra származtatott regionális scénáriók (kismértékű, 0,5°C melegedés) feltételezésével az a becslés adódott, hogy a napfénytartam 10%-os növekedése, a csapadék 10-15%-os csökkenése és végül az őszi és tavaszi fagyok ritkulása várható. A scénáriók regionális következménye az lehet, hogy megváltozhatnak egyes növények optimális termőhelyei, módosulhat egy-egy régióban a hőmérsékletileg lehetséges vegetációs periódus kezdete és hossza. Hazai vizsgálatok szerint 1°C változás mintegy 10 nappal változtatná meg e periódus hosszát. Becsülhető a száraz időszak kezdete, vége és hossza; így az évi csapadékmennyiség 10%-os változása az említett periódus hosszának 10 nappal való változását eredményezheti. Az üvegház-gázok szerepét vizsgálva azt találták, hogy az ózon mérgező, míg a széndioxidnak a növények fejlődése szempontjából kifejezetten pozitív hatása van.

Az emberi tevékenység környezetszennyező hatása részben a levegő összetételének megváltozása révén érvényesül az erdőgazdálkodás területén. Az eddigi vizsgálatok arra engednek következtetni, hogy változhat a magvándorlás mértéke, sok fafaj felújulási képessége csökkenhet, a mortalitás fokozódhat, megváltozhat a fafajok elterjedési területe. Az erdőkre gyakorolt hatások fellépésének kezdetét a 2000 körüli évekre becsülik. Amennyiben a legnagyobb hőmérsékletemelkedéssel járó scénárió realizálódna, nagy valószínűséggel 2100-ig a felújulási képesség gyengülése és nagyarányú erdőpusztulás még nem várható.

Az éghajlat és az erdőtársulás változásainak múltja, valamint az időjárás és a főbb erdőalkotó fafajok növekedése közötti összefüggések arra hívják fel a figyelmet, hogy a fafajmegválasztás, a fafajpolitika kérdéseivel sürgősen foglalkozni kell az éghajlati

szcenáriók figyelembevételével is. A szénkörforgalom és az erdő kapcsolatát is vizsgálni kell a megnövekedett széndioxid kibocsátás esetére, hiszen az erdő, mint szénrezervoár, kiemelkedő szerepet játszhat levegőkörnyezetünk minőségének kedvező alakításában.

A fokozódó energiakibocsátás befolyásolhatja az éghajlatot, ugyanakkor a változó éghajlati feltételek visszahatnak többek között az energiaigényekre. A meteorológiai tényezők ingadozásai többek között befolyásolhatják az energiagazdálkodással összefüggő természeti erőforrásokat és emberi tevékenységeket: a megújuló légköri energiaforrások jellemzőit, a vízienergia-potenciált, a kommunális (fűtési és hűtési) energiaigényt és fogyasztást, az energetikai berendezések, energia-szállító rendszerek tervezését és működését. Az éghajlati hatások sajátosan érvényesülnek ott, ahol a kommunális hűtési igény legalább olyan nagyságrendű, mint a fűtési; azaz a fogyasztói energiaigény mérlege korántsem magától értetődően kedvező.

Az energiatermelés hatása az alábbi módon befolyásolhatja a környezetet: kisebb területen - az energiatermelő beruházások révén - megváltoztatja a földfelszín sajátosságait, hőt ("hulladékhőt") és a légkör sugárzásátviteli tulajdonságait módosító szennyezőanyagokat juttat a légterbe. Valószínűnek látszik, hogy a hőszennyezés és a felszínalakítás csak lokális, illetve regionális léptékben okozhat éghajlatmódosulást. Ezzel szemben az energiatermeléssel és fogyasztással járó légköri kibocsátások globális méretekben idézhetik elő az éghajlati kép változását. Célszerű lenne, ha a leghatékonyabb üvegházgáz, a széndioxid kibocsátását radikálisan csökkenteni lehetne, ennek azonban a jelenlegi technológiai feltételek mellett olyan költségkihatásai lennének, amelyre még a legfejlettebb országok sem vállalkoznak. A világ népességének várható növekedésével számolva még az is nehezen kivitelezhetőnek látszik, hogy az összes széndioxid kibocsátást a jelenlegi szinten tartsák az elkövetkezendő évtizedekben.

Magyarországon a gazdaság energia-hatékonysága 1971 és 1987 között 30%-kal javult (ennek ellenére még mindig messze elmarad a fejlett piacgazdaságok energia-hatékonyságától). Az energiaszerkezet alakulásában az várható, hogy az elektromos- és gázenergia-felhasználás aránya növekszik. Az előrejelzés szerint, a hazai szénigények jelenlegi lassan csökkenő tendenciája megmarad a jövőben is. A teljes energiafogyasztás évi 0,6-0,8 %-os növekedési ütemére számíthatunk, ugyanaz az érték az elektromos energia esetén 1,3-1,5%. A nemzetközi ajánlásokkal összhangban lévő 10%-os széndioxid emissziócsökkentés csak akkor lesz megvalósítható hazánkban, ha az energia-hatékonyság a következő évtizedekben évente 1,3%-kal javul.

A globális éghajlatváltozások alapvetően újszerű kihívást jelentenek a társadalmi szintű stratégiai tervezés és döntéshozatal számára. A társadalomtudományok területén is megkezdődtek az éghajlatváltozás lehetséges hatásait felmérő kutatások. Az első vizsgálatok az éghajlat és a társadalmi-gazdasági folyamatok összefüggéseinek feltárására irányultak. Ez a kölcsönhatások típusainak elkülönítését, és különböző modellezési eljárások alkalmazását igényli. Megállapítható, hogy az éghajlat változékonysága és feltételezett változása, valamint a társadalmi-gazdasági jellemzők között interaktív kapcsolat létezik, ami a közvetlenül kiváltott biofizikai változásokon túlmenően a közvetett hatásokra is kiterjed. A hatásvizsgálatok készítéséhez eredményesen alkalmazhatók a jövőkutatásban bevált módszerek (matematikai-statisztikai eljárások). Ezek segítségével, valamint a már kifejlesztett környezetvédelmi

modellek kiterjesztésével alapozható meg a klímaszcenáriókra épülő társadalmi-gazdasági prognózisok kidolgozása.

A következő rész áttekintést ad az éghajlatváltozási kutatásokkal kapcsolatos tudományos együttműködés eddigi történetéről. A tanulmányt a további kutatási feladatokat és a nemzetközi együttműködéssel kapcsolatos javaslatokat összefoglaló rész zárja.



## SUMMARY

The temporal variations of compounds of natural environment have a direct or indirect impact on most socio-economic activities. Some large-scale climate anomalies with severe consequences and the observed changes in concentrations of some atmospheric trace gases have led to intense research for about the past two decades. These studies include the investigation of reasons of the changes, the interactive processes within the climatic system and the climatic impacts, respectively. Such research in Hungary was supported by the Ministry for Environment and the National Academy of Sciences. This volume is prepared and published at the Hungarian Meteorological Service and summarizes the first results of the studies about the climate change and its possible regional consequences.

The first part gives a brief review of natural and anthropogenic causes of variability and change of climate, furthermore, describes the climate changes in the past.

The second part deals with the observing network and the methods of numerical analysis of climate including the empirical-statistical methods and the numerical modelling of climatic system. The latter part presents a general description of the hierarchy of climate models emphasizing the methodological problems and the applicability of the various models. Some hypotheses on the future climate based on observations and numerical simulations are also described.

The third part briefly presents the investigations carried out to study the possible impacts of the supposed climate change on water-management, agricultural production, forest- and energy management, moreover, it discusses the general socio-economic aspects of the climatic change. On the one hand, these preliminary impact studies summarize international experiences, on the other hand, they give an account on the beginning of the researches in Hungary and their first results.

Investigations carried out in the field of hydrology show, that some regional changes experienced in the past 100-120 years (e.g., raise of levels and frequency of floods of the river Tisza, decrease of fluctuation of water-level, changes in winter ice-cover of Danube during the present century) are mostly considered as the consequences of human activity. Besides, the hypothesis that a climate change has occurred (or begun) for the past 100-120 years can neither be accepted, nor be rejected on the basis of hydrological observations. One of the reasons of the uncertainties about the climate impact studies is the stability (or instability) of climate-water relationships and their statistically parameterized forms which are derived from the historical records. Changes in climate can have essential effects upon the forms and parameters of such impact models. The hydrological impact studies usually include only several parameters. Further research should extend to other parameters and the extreme conditions, as well. Investigations based on average

data show that small changes in the values of meteorological parameters (annual characteristics of precipitation and temperature) may cause amplified changes in the values of hydrological parameters.

Agriculture and especially, the plant cultivation highly depend on weather and climate. Based on observations carried out in the past decades in Hungary, about one third of variation of yield can be attributed to meteorological reasons. In Hungary, the available radiation and heat are not limiting factors in average for the plant production (for most important crop varieties produced), however, the natural moisture supply (proper precipitation amounts during the particular phenophases or the corresponding values of the available soil moisture) is frequently not satisfactory to achieve to optimal yields and in addition it shows great variability. By use of various climate-crop models, it was determined that the part of variation attributable to the meteorological factors (i.e., their role in decreasing or increasing crop yields) exceeds 20 %. Using regional estimates for this region derived from large-scale climate scenarios by empirical-statistical methods (that is, a moderate warming of about 0.5°C in annual means which corresponds to the "low" scenario), the preliminary estimations were concluded as follows: an increase in sunshine-duration by about 10%; decrease of annual precipitation amounts by 10-15%; reduction of frost frequencies in autumn and spring. Owing to the regional consequences of climate scenarios, agricultural regions might shift, beginning and duration of growing seasons might alter etc. Specifically, annual mean temperature change of 1°C for this region might result in a change of 10 days concerning the duration of the vegetation period (determined for certain base temperature). The changes of other agro-climatological characteristics are estimated, as well. Investigating the role of greenhouse-gases it was taken into account that the increasing concentrations of the ozone (in troposphere) mean an increasing potential of toxic effects on plants, however, the growing amount of the atmospheric carbon-dioxide is highly advantageous for the plants.

Forest-management is also effected by harmful, polluting anthropogenic activity, on the one hand, through the global warming, on the other hand, through the change of components of the atmosphere. According to the investigations carried out recently, it is very probably that several considerable changes concerning the forests may occur as a response to the climate change, namely: changes in the extent of shift of seeds of various species, declines in the reproduction ability of species, an increase in the mortality etc. The first signs of these changes will probably be seen at around 2000 if the assumptions about the recent climatic change are valid. If the scenario which predicts the greatest increase in temperature will be "realized", decline of reproduction ability, destruction of forests will probably not happen till 2010. Changes of climate and the related changes in the forest types in the past, connections between climate and growing of various tree-species draw the attention to the forest management policy (strategy): the proper choice of tree-species and other questions of forest management policy are urgently to be dealt with taking into consideration the likelihoods of the various climate scenarios. The relation of carbon cycle and forests must also be studied for the cases of increased carbon dioxide emission, since forest, as an important carbon reservoir can play a very important role in controlling the environmental conditions and especially, the quality of the atmospheric environment.

The increasing atmospheric emissions from the energy sector have an essential effect on climate, at the same time, the changing climate conditions influence the energy demand (and the supply, to a smaller extent). Fluctuations of certain meteorological elements have also an impact on human activities and natural resources related to energy-management. Impact of climate is not so unambiguous (i.e., favorable) in respect to the energy consumption, especially in those regions, where the magnitude of "communal" heating demand is about the same order as that of the cooling.

Impact of energy-production may have an influence on the environment as follows: modification of surface characteristics (albedo), release of waste heat, emission of pollutants into the atmosphere. It was revealed that heat-pollution and modification of surface might probably cause modification of climatic conditions only on local or regional scales. On the contrary, emissions related to energy production and consumption might bring about change of climate on global scale. It would be the best, if the release of the most "effective" greenhouse gas, the carbon dioxide could be radically reduced. Unfortunately, this solution is so expensive at the present technological conditions that even the most advanced countries cannot afford it for the time being. Taking into consideration the expected increase of world population, even the agreement on "freezing" of the present emission levels is questionable. It would mean to keep the global emission of carbon dioxide on the present level for the coming decades.

In Hungary, the effectiveness of energy utilization by various sectors of national economy increased by 30% between 1971 and 1987. (In spite of this fact it is still far behind the energy-effectiveness of the most advanced market-economies). Concerning the structure of energy sources, it can be expected that ratio of consumption of electrical and gas energy will be increased. According to predictions, the demand for coal will further slowly decrease in the future, as well. The increase of the total energy consumption will probably be between 0.6-0.8 % per year, the same value for electric energy is 1.3-1.5% . Reduction of carbon dioxide emission in accordance with the international recommendations (reduction of about 20%) can only be realized in Hungary if the effectiveness (energy elasticity) in this period will at least be improved by 1.3% per year.

The global climate change basically means a new challenge for the socio-economic strategical planning and the decision making. Therefore, investigations have been started to reveal the possible effects of climate change on the society in general. First, attempts were made to clarify the relationships between climate and socio-economic processes. For this purpose, types of interactions had to be classified. For handling these interactions, various models were applied which incorporated the environmental factors, as well. It can be concluded that there exists an interactive connection between the variability and assumed change of climate and the characteristics of the socio-economic activities: besides the direct impacts, various indirect influences have also been considered. For impact analysis, methods used in researches of the future (mathematical-statistical models of socio-economic behavior and development) can be applied. By making a use of these methods, furthermore, by extension of the existing ecological models, socio-economic prognoses based on climate-scenarios are to be worked out.

The next part reviews the most important events in the history of the international cooperation in the field of climate change and its impacts. Special attention is paid to the

contribution of the Hungarian scientists and the need for the intensification of such efforts is emphasized.

The last part summarizes the basic statements of the investigations and gives a list of recommendations concerning the further research tasks, the interdisciplinary collaboration and the more effective participation in the international cooperation to achieve a better understanding of the possible climate change and its impacts.

## BEVEZETŐ

Az a gondolat, hogy az emberi tevékenység következményei összemérhetők egyes természeti folyamatokéval és e tevékenység módosíthatja akár a természeti környezet globális állapotát is - nem régi keletű. A természeti erőforrásokat is hosszú ideig lényegében kimeríthetetlennek tartották. A környezet állapotváltozásait a kutatók természeti okokkal magyarázták. A társadalmak ezekre a változásokra különböző módon „válaszoltak”: egyrészt igyekeztek minél hatékonyabban védekezni e változások káros hatásai ellen, másrészt arra törekedtek, hogy az előnyös hatásokat minél jobban kiaknázzák. A légkör állapotára, a földi éghajlatra, ezek változásaira is érvényesek ezek a megállapítások. Már a múlt század végén Arrhenius (1896), majd e század első felében Callendar (1938) felhívta a figyelmet az antropogén széndioxid-koncentráció növekedésének lehetőségére és annak esetleges globális következményeire, de e felvetéseknek akkor csupán elvi, elméleti jelentőséget tulajdonítottak. Wexler 1955-ben az éghajlatfluktuációk lehetséges okait a következőképpen összegezte: csillagászati okok (amelyek döntően a Föld pályaelemeinek változásával függnek össze), kontinentális okok (a földkéreg változásai, a kontinensek „vándorlása”), légköri okok (például a vulkánkitörések nyomán a légköri homályosság, a sugárzásátviteli jellemzők változása) és a szoláris okok (mindenekelőtt a „napállandó” változása). Az antropogén környezetmódosító hatások jelentőségének tényleges felismerését és elismerését, az erre vonatkozó kutatások megerősödését a 70-es évektől számítjuk. Még ennek az időszaknak a kezdetén is a globális léptékű - akár nem szándékos - hatás lehetősége inkább csak mint szélsőséges, nem kellően megalapozott hipotézis létezett. Az évtized végére, a természeti erőforrások, az energiahordozók korlátozottságának felmérésével, a levegőkörnyezet illetve az éghajlati rendszer egyes elemeiben tapasztalható tendenciaszerű változások és következményeik megfigyelésével valószerűbbé vált a globális - legalábbis részben antropogén eredetű - környezetváltozás lehetőségére vonatkozó elképzelés. Ami az éghajlati állapotot illeti, e felismerést nagyban hátráltatta egyrészt az, hogy a természetes változékonyság nagyságrendje meghaladja az esetleges éghajlatváltozás „jelének” mértékét, másrészt pedig az, hogy még a különböző antropogén éghajlatmódosító folyamatok is eltérő illetve ellentétes hatásúak. Landsberg 1979-ben még csak a növekvő légköri széndioxid-koncentráció már nem elhanyagolható, de kismértékű globális felmelegedést kiváltó hatásáról szól. Ugyanakkor Flohn 1980-ban már azt a paleoklimatikus időszakot említi meg a jövő lehetséges analógiájaként, amikor a légköri széndioxid szintje közel 500 ppm volt. Az éghajlatváltozás lehetőségének és az emberi tevékenység éghajlatmódosító hatásának jelentőségére - a kibontakozó nemzetközi együttműködés nyomán - a magyar kutatók is felhívták a figyelmet (Ambrózy, Czelnai és Götz, 1977). Napjainkra a környezeti kutatások határozottan megerősödtek; ezek sorában említhetjük meg az olyan a légköri, éghajlati rendszerhez kapcsolódó jelenségek, folyamatok vizsgálatát is, mint az „ózonpajzs” bomlása, a légkör és a csapadék savasodása, az üvegházhatás fokozódása. E témákban nagyszabású nemzetközi együttműködés alakult ki, amely már nemcsak a tudományos kérdésekre szorítkozik, hanem - egyes nyomgázok kibocsátását korlátozó - egyezményekben is megtestesül.

Akár az éghajlat térben és időben jelentékeny ingadozásáról, akár annak tendenciájában egyirányú változásáról legyen szó, a tág értelemben vett felkészülés, a hatékony alkalmazkodás fontos kérdés mind a kutatás, mind pedig a gyakorlat számára. A lehetséges hatások vizsgálata és a teendők („válaszstratégiák”) megfogalmazása természetesen az éghajlatfüggő társadalmi-gazdasági tevékenységekre, valamint a természetes ökörendszerekre is vonatkozik.

E tanulmány témája a levegőkörnyezet állapota, az éghajlat, az ezekre ható természeti folyamatok és emberi tevékenységek, valamint a légkör állapotától, változásától is függő természeti és társadalmi-gazdasági folyamatok összefüggései, kölcsönhatásai, változásaik tendenciái. A környezetvédelmi tárca támogatásával végzett kutatási tevékenység jelenlegi célja az említett jelenségekre és lehetséges következményeikre vonatkozó eddigi eredmények áttekintése, a további feladatok meghatározása. Az éghajlat megfigyelése, a légkör állapotának vizsgálata, az éghajlati rendszer modellezése, a globális és regionális légköri folyamatok kapcsolatának feltárása és az előrejelzési lehetőségek illetve korlátok

elemzése elsősorban a meteorológusok feladata. Ugyanakkor a levegőkörnyezet állapotának, az éghajlatnak a változását kiváltó okok, valamint a változások hatásainak sokrétősége miatt szükséges a meteorológiai, éghajlati és a „hatásterületek” sorában mindenekelőtt a vízgazdálkodási, a mezőgazdasági, az erdőgazdálkodási, az energiagazdálkodási valamint a társadalmi-közgazdasági kérdésekkel foglalkozó szakemberek, kutatók együttműködése.

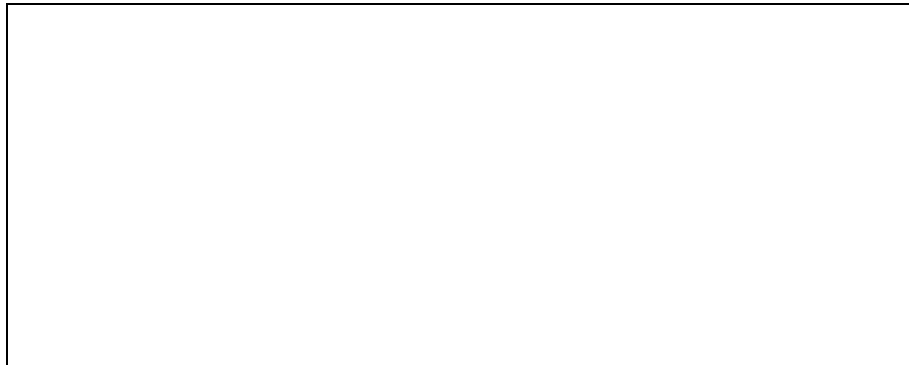
A témakör áttekintésével kapcsolatban - már előljáróban is - hangsúlyozzuk, hogy az ismeretek mai szintjén csak előzetes, durva becslések fogalmazhatók meg legyen szó akár a kiváltó okok kölcsönhatásáról, az éghajlati rendszer elemeinek változásáról, akár a változások hatásairól. E bizonytalanság méginkább érvényes a regionális folyamatokra. A globális éghajlati változások jobb megértése érdekében rendkívül intenzív kutatásokat végeznek világszerte a nagy kutatóközpontokban. Az okok és a hatások általános folyamatainak elemzésére jelentős nemzetközi együttműködés alakult ki. A regionális, térségünkre is vonatkozó jövőbeli - levegőkörnyezeti, éghajlati illetve a „hatásterületeken” végbemenő - változások feltárására, becslésére, a témakör interdiszciplináris jellegét és nemzetközi együttműködési lehetőségeit is figyelembe véve, széleskörű hazai kutatásokat kell folytatni.

# 1. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS VÁLTOZÁSÁNAK OKAI

## 1.1. A MÚLTBELI ÉGHAJLATVÁLTOZÁSOK

### Az átlaghőmérséklet változásai

Az emberiség természetátalakító tevékenysége előtti időszakban bekövetkezett, évtizedes időléptékű éghajlati változékonyságnak, valamint a hosszabb időtávú (több ezer éves) változásoknak az okai magában a természetben keresendők. Ezek az okok részben szoláris eredetűek, és a napállandó változásaihoz kapcsolhatók. Másik csoportjuk csillagászati eredetű, főként a Föld pályaelemeinek változásaival függ össze és a Föld-légkör rendszert érő napsugárzás térbeli és időbeli eloszlásának megváltozását eredményezi. Bár a csillagászati okok a Föld légkörének felső határára érkező napsugárzást évi átlagban nem befolyásolják lényegesen, de jelentős eltéréseket okozhatnak az egyes földrajzi övezetekben, és ezen keresztül a klímarendszer energiaviszonyaiban. A természetes okok között szerepelnek még a kontinentális tényezők, amelyek a földkéreg változásaival kapcsolatosak és ezen keresztül okozhatnak éghajlati változásokat. A különböző mechanizmusok jellemző időléptékeit az 1. ábra mutatja be.



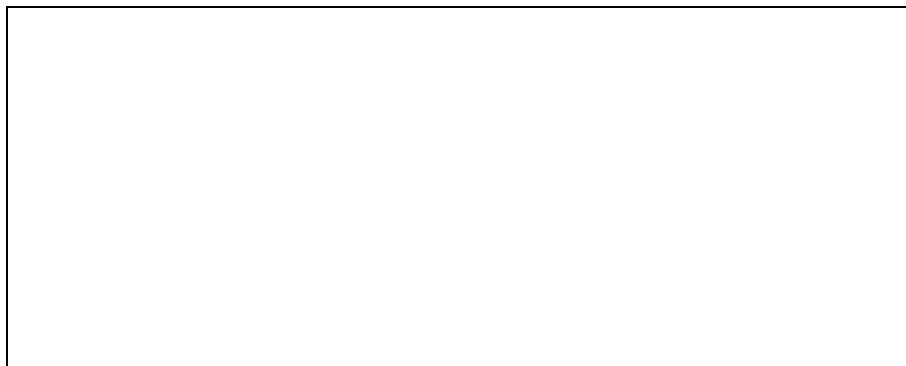
1. ábra A lehetséges és az észlelt éghajlati ingadozásokat okozó tényezők (Kutzbach, 1974)

Ezek a hatások tükröződnek a felszínközeli hőmérsékletingadozások idealizált spektrumán (2. ábra), amelyet a következő intervallumokra bonthatunk:

- Mikroléptékű ingadozások, amelyek a másodperc törtrésztől néhány percre terjednek. Létrejöttüket a turbulenciának és a különböző hullámmozgásoknak köszönhetik.
- Mezőléptékű ingadozások, amelyek néhány perctől néhány óráig terjednek (tehetetlenségi ingadozások).
- A szinoptikus ingadozások tartománya néhány órától néhány napig terjed a légkörben és néhány hét nagyságrendig az óceánban. Ehhez a csoporthoz tartoznak a napos és félnapos ingadozások, amelyeket a besugárzás, valamint a Hold és a Nap gravitációs hatásának napi menete idézi elő. (Mai ismereteink szerint ezen utóbbi folyamatok az időjárás alakulására nincsenek számottevő hatással.)
- A néhány héttől néhány hónapig tartó, úgynevezett globális ingadozások, amelyekhez a cirkulációs indexek mintegy kéthetes ingadozásai (a mérsékelt szélességeken a légkör forgásának átlagos szögsebessége a Föld felszínéhez viszonyítva) és az óceán-légkör rendszer néhány hónapos belső ingadozásai tartoznak.

- Szezonális ingadozások, mint például az éves ingadozás és felharmonikusai (ide tartozik például az összes monszun-jelenség).

- Többéves ingadozások, néhány éves periódusidővel. Ilyen - egyebek között - az egyenlítői sztratoszféra zonális áramlásának kvázi-kétéves (26 hónapos) ingadozása, az El-Nino és a Déli Oszcilláció néhány éves ciklusa a Csendes-óceán keleti részén, valamint a Golf-áramlás északi ágának 3,5 éves periódusú változása.



2. ábra A földközeli légréteg hőmérsékleti ingadozásainak idealizált spektruma (Mitchell, 1976)

- Az évszázadokon belüli ingadozások, amelyek jellemző tartama néhányszor tíz év. Ilyen például az évszázadunk első felében tapasztalható felmelegedés.

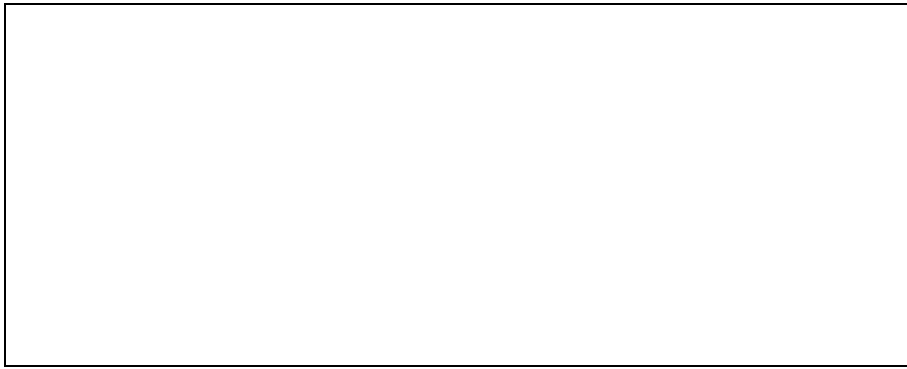
- A többszázéves ingadozások néhány évszázadtól néhány évezredig terjednek. Ilyen volt például a jégkorszak végi felmelegedés (i.e. 6500 körül), az úgynevezett klímaoptimum (i.e. 4000 és i.e. 2000 között), az utolsó nagyobb lehűlés (i.e. 1000 és i.sz. 300 között), az újabb felmelegedés (i.sz. IV.-X. sz.) és az azt követő lehűlés (XIII.-XIV. sz.), illetve felmelegedés (XV.-XVI. sz.), végül az úgynevezett „kis jégkorszak” a XVII. és a XIX. század között.

- A több tízezer éves ingadozások (például a pleisztocén jégkorszakok és a köztük levő felmelegedések), amelyek oka a Föld pályaelemeinek illetve a forgástengely és az Egyenlítő által bezárt szögnek a változása. Ebben az intervallumban a legintenzívebb a százezer éves periódusú ingadozás, mert ez van közel a földpálya excentricitásának és a szárazföldi jég-asztenoszféra rendszernek a periódusához, míg a 22000 éves periódus a precesszió, a 41000 éves a földtengely hajlásszögének ingadozása miatt lép fel.

- A kontinensvándorlás és a hegyképződési folyamatok hozzák létre a geológiai időléptékű ingadozásokat, amelyek néhányszor tíz és száz millió évig tartanak.

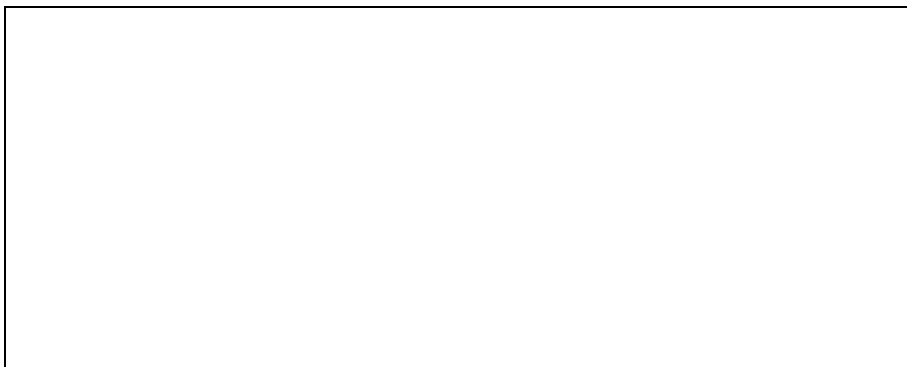
Ebben a felsorolásban nem szerepelnek olyan légköri okok, amelyek a vulkáni kitörések nyomán megváltozott légköri karakterisztikákon keresztül fejthetnek ki módosító hatást az éghajlatra. A sok paleoklimatológiai elmélet közül a csillagászati okokat vizsgáló Milankovics-Bacsák elmélet adja meg az éghajlati változások fő irányát, de mértékét, illetve a kisebb ingadozásokat már az üvegházhatás és a vulkánosság változásaival, valamint cirkulációs eltérésekkel kísérlik meg megmagyarázni. Megállapították a grönlandi jégta-  
karó zárvényaiból, hogy a glaciálisok idején a széndioxid koncentrációja csak mintegy 200 ppm volt (Bolin et al., 1985). A 3. ábra mutatja be a széndioxid koncentrációjának és a vulkáni kőzetek térfogatának időbeli változásait. Az utolsó interglaciális optimum óta (kb. 6000 évvel ezelőtt) a hőmérséklet csökken, és ezt a tendenciát extrapolálva mintegy 5000 év múlva egy hűvös, glaciális klíma kezdete lenne várható.





3. ábra A légköri széndioxid koncentrációjának és a vulkáni kőzetek térfogatának változása (Budiko, 1980)

A 4. ábra jól szemlélteti, hogy milyen nagy hőmérsékleti és csapadékbeli különbség lehetséges a klímaoptimum és a jelenlegi, valamint a jégkorszak és a jelenlegi klíma között.



4. ábra (a) Hőmérséklet-különbség (júl-aug), illetve (b) az évi csapadékkülönbség a 125-120 ezer évvel ezelőtti klímaoptimum és a jelenlegi állapot között ; (c) hőmérsékleti különbség (júl-aug) és (d) az évi csapadékkülönbség a 18 ezer évvel ezelőtti jégkorszak és a jelenlegi állapot között

A múlt század második felétől kezdődően a Föld hőmérséklete - kisebb ingadozásokkal - kb.  $0,6^{\circ}\text{C}$  fokkal emelkedett (Jones et al., 1986). Az erősödő üvegház-hatás a modellszámítások alapján inkább csak századunk közepétől játszhat lényeges szerepet (annak ellenére, hogy éppen ebben az időszakban az Északi-félgömb átlagában mintegy 15-20 évig tartó lehülés volt megfigyelhető), ezt megelőzően a gyengébb vulkánosság vagy más természetes tényezők domináltak. A melegedés az Északi félgömbön markánsabb, míg a Déli féltekén az óceánok nagyobb aránya miatt a kisebb visszaesések (pl. a negyvenes és a hetvenes évek eleje között) is elmosódottabbak. Az évszázad 5 legmelegebb éve a globálisan rekonstruált adatsor szerint a nyolcvanas évekre esik; rekorder az 1988-as, második legmelegebb az 1987-es év volt (Jones et al., 1988).

Szélsőséges időjárású évszakok és évek előfordulnak, különösen az éghajlati övek közötti átmeneti zónákban. Ezek az anomáliák - ellentétben a naponkénti időjárás szeszélyeivel - nem magyarázhatók csupán magának a légkörnek a viselkedése alapján, hanem az óceánok, a szárazföldek és a krioszféra termikus késleltetése is biztosan szerephez jut, csakúgy mint a naptevékenység és a vulkánosság. A rekord évek ezért még valószínűleg nem jelentik az üvegház-hatás esetleges drámai mértékű felerősödését, mint ahogy az 1984-86-os évek viszonylag hűvösebb volta sem adott okot az üvegház-hatás globális problémájának lebecsülésére. A lassú felmelegedés ugyanis csak a valószínűségét növeli meg annak, hogy egy-egy év földi átlaghőmérséklete rendkívüli legyen.

## A világtengerek szintje

A tengerszint magasságát a néhány évtizedes időskálán alapvetően két tényező határozza meg. Az egyik az a víztömeg, amely a szárazföldi jégtakarókban tározódik, a másik pedig az óceán hőtágulása, amely arányos a melegedés mértékével és azzal a vízmélységgel, ameddig a felszíni melegedés lejut a mély-óceánba. Az Antarktisz fő jégtömbjének a térfogata 25,9 millió km<sup>3</sup>, aminek teljes elolvadása 64,8 méter tengerszint-emelkedést okozna (DOE, 1987). A tenger felszíne alatti kontinentális talapzaton nyugvó Nyugat-Antarktiszi és az Antarktisz-félsziget szilárd felszínére fagyott jégtömb együttes térfogata 3,4 millió km<sup>3</sup> (8,5 m emelkedés). A várható felmelegedés miatt a távolabbi jövőben a Nyugat-Antarktiszi jégtáblát a tenger alatt rögzítő kapcsolat elvékonyodhat, ami azzal jár, hogy a jégtakaró az áramlatokkal az alacsonyabb szélességek felé sodródva végülis elolvad. Ez a kb. 6 méter szintemelkedéssel járó olvadás azonban mai ismereteink szerint lassú, így e katasztrófától a következő száz évben még nem kell tartanunk. A Grönlandi jégtömb térfogata 3,4 millió km<sup>3</sup> (7,6 m). A kisebb jéghegységek, gleccserek és a talaj-jég (permafrost) együttes térfogata 0,1 - 0,2 millió km<sup>3</sup> (0,4-0,5 m). A tengeri jég térfogata 0,07 millió km<sup>3</sup>, amely elolvadás esetén sem emeli a tengerszintet. A szárazföldi hótakaró térfogata az Északi félgömbön csupán 0,002 millió km<sup>3</sup>, a délin pedig további két nagyságrenddel kisebb.

Az említett folyamatok jelenlegi tendenciája is csak nagy bizonytalansággal becsülhető. Valószínűleg a termodinamikai folyamatok nagy időbeli tehetetlensége miatt jelenleg az Antarktiszi jégképződés évszázadonként 0-12 cm-rel csökkenti a világtenger szintjét, míg a grönlandi jég hatása az évszázadonkénti 5 cm csökkentés és a 3 cm növekedés közé esik. A légköri melegedésre gyorsabban reagáló gleccserek és a kisebb jégtakarók izolált hatása 2-8 cm tengerszint-emelkedés. E három tényező együttes hatása - valamennyi szélsőértéket megengedve - a 17 cm csökkentéstől a 11 cm emelkedésig terjed évszázadonként.

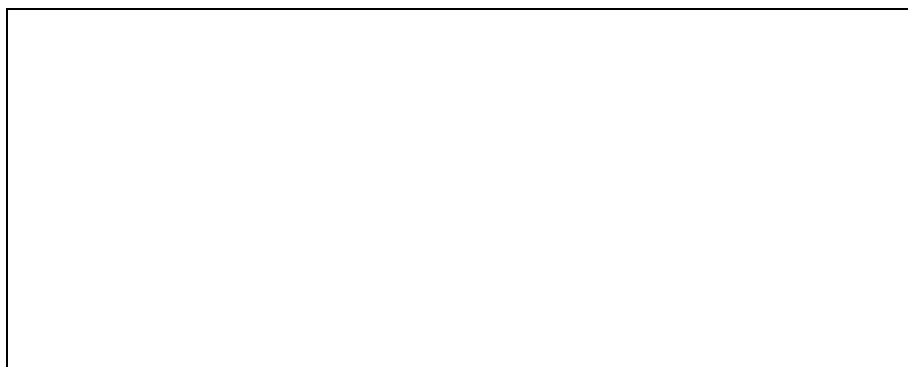
A világóceán szintjének emelkedési trendje az elmúlt száz évben 10-15 cm volt, párhuzamosan a felszíni léghőmérséklet emelkedésével. E változás nagyrészt bizonyára a másik meghatározó folyamattal, a tengervíz hőtágulásával magyarázható. Figyelembe véve, hogy a víz térfogat hőtágulási együtthatója 0,00018 1/fok és a felső rétegek melegedése kb. fél fok lehetett, akkor ez a melegedés mintegy 1-1,5 km vastag vízrétegre terjed ki.

A világtengerek szintje a jelenlegi jégkorszakon belüli glaciális-interglaciális átmenetek évezredes időskáláján több tíz méteres szintkülönbségeket mutatott. Ebben azonban elsősorban a kontinentális jégtakaróban végbement változások domináltak a hőtágulással szemben. Ha ugyanis a teljes, átlagosan 4 km mélységű világóceán például 3,5 fokkal felmelegedne, a hőtágulás önmagában csupán 2,5 méterrel emelné a világóceán szintjét.

## 1.2. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÁSÁNAK TERMÉSZETES ÉS ANTROPOGÉN OKAI

### Az üvegház-gázok

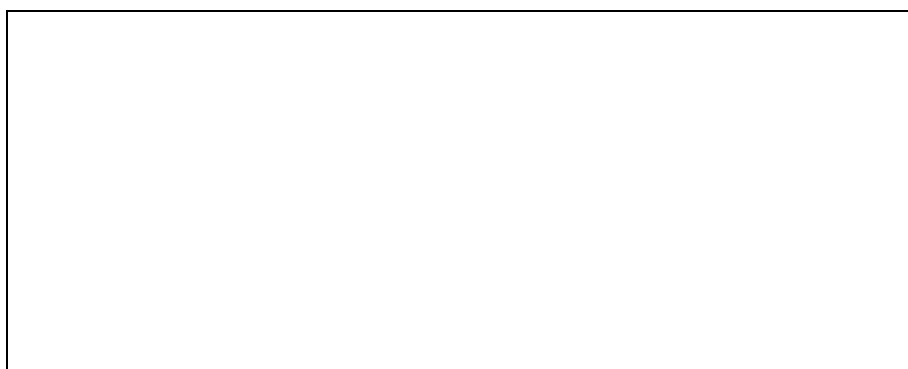
E gyűjtőcím alá elsősorban a szén-dioxid (CO<sub>2</sub>), valamint a metán (CH<sub>4</sub>), a dinitrogén-oxid (kéjgáz, N<sub>2</sub>O), a troposzférikus és sztratoszférikus ózon (O<sub>3</sub>) és a halogénezett szénhidrogének (CFC) tartoznak. Néhány további gáz, mint a szén-monoxid (CO), a különféle nitrogén-oxidok (NO<sub>x</sub>), a kéndioxid (SO<sub>2</sub>), melyek kis koncentrációjuk és rövid tartózkodási idejükből adódó korlátozott terjedésük miatt, a klímaváltozás szempontjából figyelmen kívül hagyható (Bolle et al., 1985), noha lokális környezetkárosító hatásuk jelentékeny. Az üvegház-gázok rövidhullámú (azaz 4 mikrométernél kisebb hullámhosszú) sugárzás-elnyelő képessége lényegesen gyengébb a hosszuhullámban sávokban mérhetőhöz képest (Ramanathan, 1981). Emiatt koncentrációjuk növekedése végsősoron a Föld-légkör rendszer magasabb hőmérsékletét eredményezi (ami nagyobb, hosszuhullámú hőmérsékleti kisugárzással jár együtt). A CO<sub>2</sub> illetve a többi nyomgáz együttesen közel azonos mértékben járul hozzá az üvegház-hatás erősödéséhez (5. ábra).



5. ábra Az üvegházgázok részesedése az üvegházhatásból

A sztratoszférába feljutó egyes nyomgázok az üvegház-hatás közvetlen erősítése mellett közvetett befolyást is gyakorolnak az éghajlatra az ózonpajzs erősségét módosító kémiai reakciókon keresztül (Dickinson and Cicerone, 1986). Az ózonkoncentráció csökkenésének elsődleges következménye az ultraibolya sugárzás növekvő részének átengedése.

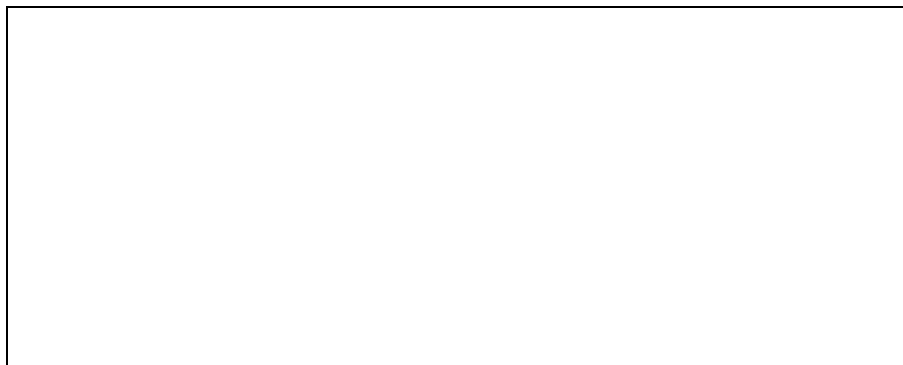
A fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó szén-dioxid klímamódosító hatására Arrhenius már 1896-ban rámutatott. A koncentráció növekedésének tényéről 1958 óta vannak közvetlen bizonyítékaink, de a kontinentális jégzárványok kémiai analízisével korábbi időszakok légköreinek összetétele is megállapítható. Eszerint a szén-dioxid koncentrációjának lassú emelkedése már a XIX. század első felében, tehát még az ipari forradalom előtt megindult (Siegenthaler, 1984; Oeschger és Siegenthaler, 1987; 6.ábra); mértéke jelenleg 1,5 ppm/év (Ciborowski, 1989). A jelenlegi, illetve az elkövetkező évtizedekben várható CO<sub>2</sub>-koncentrációk az elmúlt 30 millió évre visszatekintve átlagosak, míg a 70 millió évnél régebbi időszakokban a CO<sub>2</sub>-koncentráció ennél lényegesen nagyobb volt.



6. ábra A légköri CO<sub>2</sub> koncentrációjának változása

A fosszilis CO<sub>2</sub>-kibocsátás közel exponenciálisan nő. Ehhez járul még mintegy 1-3 Gt/év biológiai eredetű kibocsátás (fatüzelés, erdőirtás, talajművelés; Detweiler and Hall, 1988). A jövőre vonatkozó becslések általában a kibocsátás évi 1-2 százalékos tartós növekedését prognosztizálják. A szén-dioxid kibocsátás földrajzi súlypontja a fejlett ipari országokról fokozatosan az elmaradottabb, fejlődő térségek felé tolódik. A fosszilis eredetű kibocsátás mellett lényeges tényező, a nem-fosszilis kibocsátás, az óceán változó széndioxid elnyelő-képessége, a biomasszába fotoszintézis útján történő visszaépülés üteme stb. E folyamatokat az ún. szén-körforgalmi modellek írják le. A széndioxid-kibocsátás növekedésétől függően annak 30-60 %-a marad a levegőben (Bolin et al., 1985), míg a többi elnyelődik főleg az óceán mélyebb rétegeiben, illetve végül a tengerfenék mészkő-képződményeiben.

A metán koncentrációja a jégzárványok elemzése alapján az elmúlt két-háromszáz év során megkétszereződött (Rasmussen and Khalil, 1984). Jelenlegi koncentrációja 1,7 ppm, évi növekedési üteme 1,1 % (7. ábra). A koncentráció-növekedés a földi népesség gyarapodásával közel párhuzamosan alakult. Ennek az lehet a magyarázata, hogy a metán anaerob (oxigéntől elzárt) képződési módjai (kérődzők, elárasztott rizsföldek, mocsarak és lecsapolásuk, biomassza-égetés, földgáz- és szénbányászat) közül több is szorosan kapcsolódik a népesség élelméhez és energia-igényéhez (Pearman and Fraser, 1988). A metán nyelője főként a troposzféra, ahol a metán OH-gyök jelenlétében fotokémiai úton elbomlik (Holzapfel-Pschorn and Seiler, 1986). Valószínű, hogy kapcsolat van a hőmérséklet és a metán-felszabadulás sebessége között, ami tovább erősíti az üvegház-hatást (Hameed and Cess, 1983).



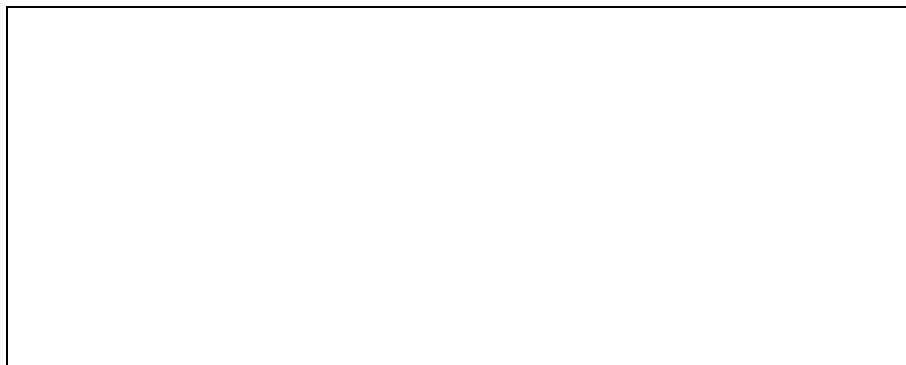
7. ábra A metán koncentrációjának változása

A dinitrogén-oxid koncentrációja évente 0,2-0,3 %-kal nő, értéke jelenleg 0,30 ppm. Fő forrása a műtrágyázás és a biomassza- valamint a szén-égetés, nyelője a sztratoszférikus fotolízis, melynek során ózon-roncsolással N<sub>2</sub>O keletkezik (Kavanaugh, 1987). Troposzférikus nyelők híján az N<sub>2</sub>O légköri tartózkodási ideje igen hosszú, kb. 170 év.

A halogénezett szénhidrogének (freonok és halonok) mai ismereteink szerint kizárólag antropogén eredetűek. Koncentrációjuk anyagoként eltérő ütemben, évi 1-10 százalékkal növekszik. Tartózkodási idejük csaknem egy évszázad, ezért a koncentráció csak nagy késéssel követi az esetleges - termelésükre, felhasználásukra vonatkozó - korlátozás megkezdését. Az eddig kibocsátott CFC-k alig 10 %-a bomlott el napjainkig a sztratoszférában. E bomlás - a katalitikus folyamatok mellett - elősegíti az ózonréteg ritkulását.

Az ózon a légkörben természetes körülmények között is mindig jelen van. Az ultraibolya sugárzást elnyelő tulajdonsága és kémiai aktivitása miatt szerepe jelentős. Napjainkban egyidejűleg két problémával is szembe kell néznünk. Az egyik a sztratoszférában az ózon-tartalmának csökkenése (8. ábra), a másik pedig a felszínközeli ózon-koncentráció növekedése, elsősorban az iparosodott területek tágabb környezetében. Az ózon több, mint 9/10-ed része a sztratoszférában található, s koncentrációját főleg a dinitrogén-oxid és a halogénezett szénhidrogének csökkentik. A naptevékenység ingadozásai miatt (is) az ózonkoncentráció egyirányú időbeli változásai nehezen felismerhetők. A sztratoszférikus ózon csökkenésére az Antarktisz feletti ún. ózonlyuk felfedezése hívta fel igazán a figyelmet. A Déli sarkvidék feletti igen hideg levegőben ugyanis a jégkristályok felületén olyan ún. heterogén reakciók játszódnak le, melyek az ózon-koncentráció akár 50 százalékos csökkenését is okozhatják. Az alacsony koncentrációhoz a déli félteke telén kialakuló szimmetrikus pólus körüli cirkuláció is nagyban hozzájárul. Az északi félgömb telét követően ilyen mértékű ózon-ritkulást korábban nem tapasztaltak, de az utóbbi időben az Arktisz felett is megfigyeltek hasonló jelenséget. Az ózonpajzs védelme nemzetközi szerződésekben is deklarált elemi létérdekünk. A nem túl jelentős össz mennyiségű és rövid - néhány hetes - tartózkodási idejű troposzférikus ózon koncentrációját intenzív napsugárzás mellett elsősorban más anyagok (NO, NO<sub>2</sub>, CO és különféle szén-hidrogének) légköri kibocsátása

emeli. Az elmúlt 2-3 évtizedben az iparosodott térségekben a troposzférikus ózon növekedése kb. 10 % volt.



8. ábra Az ózon koncentrációjának változása

### A klímaváltozás további külső tényezői

Az éghajlati rendszer (légkör, világóceán, szárazföldek, krioszféra és biomassa) állapotának változását a külső tényezők változásai és a rendszer belső tényezőinek változékonysága együttesen határozzák meg. Az üvegház-gázok koncentráció-változásai mellett a további éghajlati „kényszerek” két fő csoportba sorolhatók: globális, döntően természetes eredetű tényezők (naptevékenység, vulkánosság); regionális, eredetük vagy változásaik oka szerint antropogén hatások (troposzférikus aeroszolok, antropogén hőtermelés, felszínátalakítás). Az alábbiakban röviden áttekintjük az egyes tényezők fontosabb sajátosságait.

Földtörténeti időléptékben a Nap változó csillag, amelynek sugárzása a látható tartományban - ahol az energiakisugárzás túlnyomó része realizálódik - évtizedes időskálán legfeljebb 0,1 %-os nagyságrendű ingadozást mutat. Ez 0,1-0,2°C fokos egyensúlyi hőmérséklet-ingadozásnak felel meg. E nem túl jelentős közvetlen energetikai „szabályozás” mellett a sugárzás ultrabolya tartományában végbemenő, többször tíz százalék nagyságrendű fluktuáció a sztratoszféra ózontartalmának változtatásain keresztül további hatást gyakorolhat az éghajlatra. Egy másik, még kevésbé feltárt hatásmechanizmus juthat érvényre a napaktivitás és a troposzféra elektromos mezeje között. E kapcsolatok valószínűsíthetően „trigger”-ként (elsődleges hatáskiváltó tényezőként) befolyásolhatják a légköri folyamatokat. A viszonylag kicsiny energia-dózisok ugyanis arra elegendőek, hogy a légkörben mindig jelen levő instabil állapotok éppen ennek a hatására érjenek el egy, a minőségi átalakuláshoz szükséges küszöböt és ezáltal új légköri képződmények (pl. nagytérségű ciklonok) jöjjenek létre. Összességében azonban valószínű, hogy a csekély energia-szintbeli ingadozás és a viszonylag rövid karakterisztikus idők miatt a naptevékenység szerepe a jövőben másodlagos lesz az üvegház-gázokkal szemben.

Egy-egy vulkán kitörése során kén-dioxid és más, főleg szilárd alkotórészek kerülnek a levegőbe. Ez utóbbiak hetek alatt kiülepednek a légkörből, ám a kén-dioxid a sztratoszférában kisméretű kénsav-cseppekké alakulva a kitörés után néhány évig a sztratoszférában marad. E kénsav-ernyő hatására gyengül a felszínre érkező napsugárzás, illetve ennél kisebb mértékben csökken a felszínről távozó hosszúhullámú (4 mikrométernél nagyobb hullámhosszú) kisugárzás. Ennek eredményeként a felszín közelében csökken, a sztratoszférában (kb. 20 km magasságban) viszont emelkedik a hőmérséklet. Arról, hogy mikor milyen erős vulkánkitörés volt, csak közelítő és korántsem ellentmondásmentes megfigyelések állnak rendelkezésre. Az 1920 és 1960 közötti időszak csaknem mentes volt a kitörésektől, míg a korábbi évszázadokra vonatkozó becslések az 1960 utáninál is intenzívebb vulkánosságról tanúskodnak. Íjabban egy-egy kitörés sugárzási

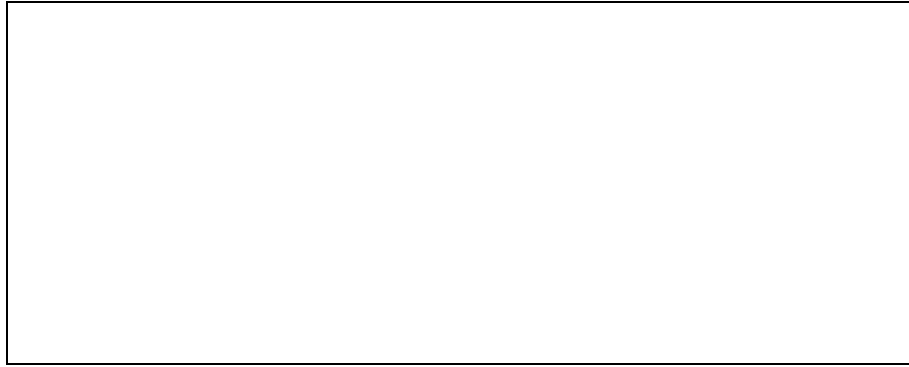
jellemzőit is mérték és a globális hőmérsékleti következményeket is modellezték. Az El Chicon vulkán 1982. évi nevezetes kitörése például kb. fél fokos hőmérséklet-csökkenést okozott a kitörés utáni 3.-4. évben az Északi félgömb átlagában. E fél fok megfelel az elmúlt száz év nagy kitörései utáni átmeneti lehűlések átlagos mértékének is. (A vulkánkitörésektől mentes időszaknak ugyanakkor néhány tized fokkal magasabb átlaghőmérséklet felel meg.)

Az antropogén aeroszolk egyetlen lényeges kivétellel a troposzférában találhatók. A kivételes mechanizmus a karbonil-szulfid (COS) felszabadulásával kapcsolatos, amely „vulkánmentes” időszakban a sztratoszférikus kénsav-réteg kéntartalmának fő forrása. A nagy mennyiségben kibocsátott kén-dioxid ugyanis nagy oldhatósága és kémiai aktivitása miatt csak kis arányban jut el a sztratoszférába. A korszerűbb szénbázisú tüzelőanyagok előállítása és a kénleválasztás sajátos módon növeli a karbonil-szulfid kibocsátás mennyiségét. A koncentráció-növekedés mértéke egyelőre nem ismert, de nem zárható ki, hogy az ipari kibocsátás növekedésével a későbbiekben a karbonil-szulfid a vulkánossághoz hasonló mechanizmus szerinti, az üvegház-hatást részben ellensúlyozó hűtő hatást fejt ki.

A troposzférikus aeroszolk (por, korom, szulfátok, homok, tengeri sók stb.) mennyiségének növekedése a jövőben eléggé valószínű, sőt a levegő elektromos vezetőképességére és az ún. másodlagos aeroszolk képződésében részt vevő gázok (pl. kéndioxid) koncentrációira vonatkozó megfigyelések szerint a Föld több körzetében már meg is kezdődött. Ennek hatása a globális éghajlatra azonban az üvegház-gázok feldúsulásához képest valószínűleg kisebb egyrészt a rövid - maximum néhány hetes - légköri élettartam miatt korlátozott térbeli elterjedés, másrészt a sugárzási mérlegben játszott bizonytalan előjelű szerep miatt. Az aeroszolk felszaporodásának energetikai következménye ugyanis saját sugárzásátviteli jellemzőik mellett a talaj és a felhőzet sajátosságaitól is erősen függ. Ezek pedig - miként magának a légköri aeroszolk az összetétele is - térben és időben erősen változóak. Egyes régiókban - így például az északi sarkvidék telén felhalmozódó szén-tartalmú aeroszolk miatt kialakuló ún. arktikus homályhoz kapcsolódva - az aeroszolk klímamódosító hatása így is jelentős lehet. Egy másik mechanizmus a felhők kicsapódását illetve kifagyását szabályozó, ún. kondenzációs- és jégmagvak számának a változása ugyancsak módosíthatja az éghajlatot.

Az antropogén felszín-módosítás további következménye lehet (t.i. a változó felhasználattal is befolyásolt aeroszolk-összetétel mellett) a növényzet (növénytakaró) szerkezetének megváltozása. A legsúlyosabb gond az elsivatagosodás, ami főleg a szubtrópusi öv nyugtalanító problémája (noha már a mediterrán körzetekben is megfigyelhető). A szavannák és a sivatagok határán az éghajlat instabil: bizonyos időszakokban sivatagi jellegű, máskor viszont lehetővé teszi fejlett növényzet kialakulását. Csakhogy ekkor a nem kellően kíméletes növénytermesztési mód és a „túllegeltetést” eredményező intenzív állattenyésztés lehetetlenné teheti a növényzet reprodukcióját, s végsősoron kizárja, hogy a szavanna-övezet tartósan fennmaradjon. E folyamatot erősíti, hogy ha számottevő területen a szavannából nagyobb fényvisszaverő-képességű sivatag lesz, akkor csökken a rövidhullámú sugárzás-bevétel, tehát csökken a felszíni hőmérséklet, emiatt pedig gyengül a feláramlás és ezért csökken az amúgy is kis mennyiségű csapadék a passzát övezet leszálló ágában a szárazföldek felett. Ez a növényzet további pusztulásához vezet („pozitív visszacsatolás”).

A másik veszélyforrás a trópusi övben végbemenő nagyarányú, évente Belgium területével egyező mértékű őserdő-pusztítás. Ennek elsődleges éghajlati következménye ugyancsak a hasznosított felszín nagyobb fényvisszaverő képessége az erdőéhez képest. Néhány éghajlati modell-számítás szerint e két folyamat együttes hűtő hatása globális átlagban valószínűleg a jövőben sem lesz összemérhető az üvegház-gázok okozta melegedéssel. A fentiek mellett azonban a növénytakaró, az őserdő-borította terület csökkenése jelentősen befolyásol(hat)ja a légköri széndioxid-forgalmat is (9. ábra).



9. ábra Az erdőterületek mérete kontinensenként

Az antropogén hőtermelés lokális következményei városi hősziget-hatás néven már régóta ismertek. A városok belterületén bizonyos időjárási helyzetekben több fokkal melegebb van, mint a peremkerületekben. Jelenleg földi átlagban az antropogén hőtermelés mintegy tízezred része a felszínen elnyelt napsugárzásnak, tehát hatása globális léptékben ma még elhanyagolható. Ugyanakkor egyes nagyvárosokban a két hatás már közelítőleg hasonló nagyságrendű. Az antropogén hőtermelés jövőbeni alakulásának becslései szerint a várható növekedés globális átlagban a jövő század közepére  $0,2-0,3^{\circ}\text{C}$  lehet. Ha az antropogén többlet-hő (és az általa kiváltott melegedés) egyenletesen oszlana el a Földön, akkor valószínűleg nem kellene jelentős következményeivel számolni, de az erős térbeli koncentráltóság akár a légkörzés nagyobb léptékű módosulását is kiválthatja.

Az ismertebb természetes és antropogén éghajlatalakító tényezők közül kiemelkednek az üvegház-gázok, mint a globális éghajlat jövőjét elsősorban meghatározó elemek. Ezen belül a  $\text{CO}_2$  potenciális szerepe egyenértékű az összes többi üvegház-gázéval. A fennmaradó tényezők időlegesen mintegy fél fok erejéig visszafoghatják a növekvő melegedést, míg más időszakokban összességükben további - de szintén csekély - mértékben maguk is hozzájárulhatnak a légkör globális felmelegedéséhez.

## **2. A GLOBÁLIS ÉGHAJLATI RENDSZER ÉS A REGIONÁLIS ÉGHAJLAT SZÁMSZERŰ VIZSGÁLATÁNAK MÓDSZEREI, AZ ÉGHAJLAT MODELLEZÉSE**

### **2.1. AZ ÉGHAJLAT MEGFIGYELÉSE**

Az éghajlati rendszer állapotára, változásaira vonatkozó elsődleges ismereteink forrásai a megfigyelések. A rendszer állapotjelzőit a megfelelő műszerek, megfigyelési eljárások segítségével közvetlenül megismerhetjük, rögzíthetjük, a műszeres mérések azonban csak az utolsó száz-kétszáz évre terjednek ki. Emellett egyrészt a megelőző földtörténeti, történelmi korok éghajlatának meghatározására közvetett eszközök alkalmazhatók, másrészt a megfigyelési technika napjainkban is továbbfejlődik (s ezáltal pontosabb, részletesebb adatokhoz juthatunk).

#### **Közvetett észlelések**

Olyan időszakok, illetve olyan földrajzi helyek klimatológiai paramétereire, amelyekről nincs műszeres mérési eredményünk, közvetett úton következtetnek. Ehhez feltételezik, hogy az éghajlatra mindenütt és mindenkor érvényesek a már megismert alapvető törvényszerűségek, összefüggések. Ezen az alapon rekonstruálhatók a földtörténeti korokban lezajlott események. Az alkalmazott paleoklimatológiai módszerek döntő része nem ad határozott választ a kutatókat érdeklő mennyiségi kérdésekre (elsősorban az évi középhőmérséklet és csapadékmennyiség változásaira). Minden módszer-csoportnak, amelyekkel az éghajlat különböző geológiai mutatóit becsülik (rekonstruálják), megvannak a saját hibái. Röviden a következő eljárások említhetők: litológiai, litogenetikus, az állat-, a növényvilágra alapuló módszerek, valamint a paleotermometrikus vizsgálatok. A legkonzervatívabbak a litológiai és a geokémiai tulajdonságok. Ez azt jelenti, hogy a többi módszer, amely döntően a szerves világ valamely jellemzőinek vizsgálatát jelenti, sokkal változékonyság, érzékenységi, azaz a fluktuációkat jobban követi, de e sajátosság egyben jelentős hibák forrása is lehet. Az élőlények a geológiai idők során viszonylag gyors evolúcióra képesek és nagyfokú a differenciáltságuk. A külső közeg változásaihoz alkalmazkodtak, és ennek következtében bizonyos morfológiai tulajdonságaik alakultak ki. Ennek ellenére egyes reliktumfajok sokáig képesek létezni számukra idegen klimatikus körülmények között is. Így, a tévedések elkerülése végett, a paleoklimatikus kutatások során mindig megkísérlik - az egyéb lényeges hatásokat is figyelembe véve - átfogó vizsgálatok végzését. A litológiai vizsgálatok főleg az üledékes kőzetek analizálásán alapulnak. A litogenetikus formációk elemzését az teszi szükségessé, hogy gyakran nem elég egyes kőzeteket vizsgálni, hanem az együttes előfordulásukat, egymásra hatásukat, más indikátorokkal való kölcsönös kapcsolatukat is tekintetbe kell venni. Az állatvilág jellemzőinek vizsgálatán alapuló paleoklimatológiai módszerek két fő részre bonthatók: a szárazföldi és a tengeri faunával kapcsolatosakra. A tengerekben közvetlenül a hőmérséklet és a sótartalom hat az élőlényekre. A sótartalom változása döntően befolyásolja a nedvesítési és párolgási folyamatokat. A szárazföldi állatvilág jobban ki van téve az éghajlat változékonyságának és dinamikájának. Az állatok szervezetének bonyolultságával együtt térbeli elterjedésük is növekszik. A tengerben a különböző (hideg vagy meleg) áramlatok módosíthatják egyes fajok életterét, de e változások csak viszonylag kis területre terjednek ki. A paleobotanikai módszerek közül az évgyűrűk vizsgálatát és a pollenanalízist emeljük ki. E vizsgálatok alapja az, hogy a nedvességtől, s részben a hőmérséklettől függ a törzs növekedése, illetve a virágporszem burka sokáig megmarad, és bonyolult formája, nagyfokú változékonysága miatt jól jellemzi a fajt (egyben annak klímfüggő elterjedését). A paleotermikus módszerek közül hármat említünk meg: az izotópos módszert, a magnéziumos és a stronciumos paleotermometriát. Az első esetben azt használják ki, hogy a természetben a természetes izotópok aránya



hőmérsékletfüggő. A magnéziumos módszer a kagylóhéjak összetételét vizsgálja. Ugyanis a kalcium és a magnézium aránya függ a földrajzi szélességtől és az élettér tengerszint alatti mélységétől, de végsősoron a hőmérséklettől is. A stronciumos módszert édesvízi molluszkák héjának vizsgálatánál alkalmazzák. Az említett eljárások pontossága messze elmarad a műszeres mérésekétől.

## **Közvetlen mérések: klimatológiai megfigyelések és az éghajlatváltozás megfigyelési követelményei**

Klimatológiaiailag hasznosítható hosszúságú adatsorunk csak a konvencionális megfigyelési módszerek alkalmazásának időszakából van, bár lassanként a műholdas mérések hossza is megfelelő lesz.

A meteorológiai mérésekkel szemben támasztott legfontosabb követelmények a mérés pontossága és reprezentativitása. A pontosság kapcsán megkülönböztetünk objektív és szubjektív (észlelési) hatásokat. Ez utóbbiakat az ember (az észlelő) viszi bele a mérés folyamatába (pl. leolvasási pontatlanság), míg az objektív tényezők főleg a műszerek minőségét és a mérés elvét jelentik. A műszerek minőségének változását rendszeres kalibrálással, esetleg korrekciók alkalmazásával ellensúlyozzák. A megfigyelések reprezentativitása alatt azt értjük, hogy a mért érték jellemző a környezetében levő paramétermezőre, annak értékeitől valamilyen hibaküszöbnél nagyobb mértékben nem tér el. Hiányzó adatok esetén, a megfelelő meteorológiai paraméter értékét interpolációval határozhatják meg. Mind a pontosság, mind a reprezentativitás követelményének a célja az éghajlat, a légkör tényleges tér- és időbeli állapotának, változékonyságának minél egzaktabb megfigyelése, leírása és elemzése (vagy összefoglalóan „monitoringja”). Különösen a változékonyság és a változás kimutatása (detektálása) szükségessé teszi, hogy a különféle okokból keletkező hibák, illetve a helyi hatások vagy megfigyelési körülmények változásaival kapcsolatos inhomogenitások ellenére az éghajlat nagytérségű állapota megfelelő pontossággal megadható legyen (Karl, 1986; Crummey, 1986). Az esetleges hosszútávú globális éghajlatváltozások „monitorizálási” követelményeit korábban nem vagy alig vették figyelembe az állomáshálózatok fejlesztésénél, bár a regionális, kisebb térségű éghajlatváltozások feltárása érdekében (is) törekedtek az ún. referencia állomások rendszerének kialakítására.

## **A légkör összetétele és az éghajlati rendszer**

A klimatológiai elemek közvetlen megfigyelése mellett a klímarendszer összetevőiről is egyre több adatot gyűjtenek, melyek ugyancsak fontosak a rendszer állapotának tanulmányozásához, az összefüggések feltárásához illetve az esetleges állapotátmenetek felderítéséhez. =gy többek között napfizikai adatokról, a tengerek állapotára vonatkozó mérésekről, a krioszféra változásainak (pl. a gleccserek vagy a sarki jégtakaró kiterjedésének) megfigyeléséről van szó. A Nemzetközi Geoszféra Bioszféra Program (IGBP) keretében, illetve általánosabban véve az ICSU égisze alatt a természeti környezet megfigyelésére számos programot dolgoztak ki. Emellett külön hálózat működik a természeti környezet egyes elemeiben megjelenő antropogén szennyezőanyagok megfigyelésére, valamint - referencia jelleggel - a „háttérszennyeződési” szintek meghatározására. Ez utóbbi célra - a légkör esetében - speciális WMO-hálózat létesült, melynek észlelései kiterjednek a légkörben felszaporodó különböző halmazállapotú szennyezőanyagok összetételének, koncentrációjának mérésére, valamint a csapadék kémiai összetételének elemzésére. 1989. júniusában a WMO Végrehajtó Bizottsága a már meglévő globális mérőhálózatok tevékenységének jobb koordinálása érdekében létrehozta a Globális Légköri Megfigyelőszolgálatot (Global Atmosphere Watch, GAW). Az e keretbe tartozó megfigyelő rendszerek közül a legrégebbi a Globális Űzönmegfigyelő Rendszer (GO3OS), amelyet 1957-ben alapítottak. A Nemzetközi Űzön Egyezményrel összhangban és több mint 60 tagországgal együttműködve végeznek folyamatos megfigyeléseket mintegy 140 állomáson. A rendszer bővülése és „tekintélyének” gyarapodása annak is köszönhető, hogy a 70-es években felfedezték az emberi tevékenység ózontbontó hatását, amelyre 1975-ben a

WMO a „Nyilatkozat az emberi tevékenység ózonréteg-bontó hatásáról” című tanulmányában hívta fel a figyelmet. Az 1960-as évek közepén alakult meg a Léggöri Hátterszennyezés Megfigyelő Hálózat (Background Air Pollution Monitoring Network, BAPMoN), amelynek célja a légkör összetételében végbemenő változások megfigyelése. A BAPMoN a Globál Environmental Monitoring System (GEMS) legfőbb információs forrása. Jelenleg a mérőhálózat 196 állomásból áll, 152 ezek közül csapadékkémiai méréseket végez, a légköri turbiditás mérése 90 BAPMoN állomáson történik; 23 CO<sub>2</sub>, 22 O<sub>3</sub>, 7 CH<sub>4</sub> és 5 CFC-mérő állomás működik. 1977-ben az ENSZ Európai Gazdasági Közössége, a WMO és a UNEP létrehozta a levegőszennyező anyagok terjedését megfigyelő európai hálózatát (Cooperative Programme for the Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe, EMEP). Összefoglalva, a GAW fő célja a következő mérések elvégzése: üvegház-gázok (CO<sub>2</sub>, CFC-k, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>); az ózon felszíni és teljes vertikális mennyisége, függőleges profilja; sugárzás és a légkör optikai mélysége; a csapadék kémiai összetétele; reagens gázok (kén- és nitrogénvegyületek, CO); részecskék (aeroszolkok) koncentrációi és összetételének jellemzői; radionukleidok. A légkörre, az éghajlatra, az éghajlati rendszerre vonatkozó megfigyelési adatokat világközpontokban gyűjtik össze, ellenőrzik, rendszerezik, tárolják. Ilyen központ például: a kanadai ózon-, az amerikai légköri homályosságai illetve csapadékanalízis-méréseket, a szovjet a sugárzási, a csehszlovák és a nyugatnémet a csapadékminták laboratóriumi analízisét végző központ. A legújabb a BAPMoN méréseire támaszkodó üvegházgázokkal kapcsolatos méréseket feldolgozó, tároló japán központ. A „konvencionális” meteorológiai, klimatológiai méréseket gyűjtő világközpontok Washingtonban (Asheville-ben), Moszkvában (Obnyinszkban), illetve Melbourne-ben vannak. A környezeti kutatások fokozódása várhatóan a megfigyelőrendszerek további fejlődését vonja maga után.

## **2.2. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS VÁLTOZÁSÁNAK EMPIRIKUS ÉS STATISZTIKAI VIZSGÁLATA**

Statisztikai módszerekkel a közvetett vagy közvetlen úton nyert - az éghajlati elemekre vonatkozó - megfigyelési adatsorokat, az elemek változékonyságát, az idősorokban esetlegesen bekövetkezett változásokat, a különböző léptékű és térségekre vonatkozó éghajlati jellemzők közötti összefüggéseket vizsgálják. A földi éghajlat hosszútávú múltbeli változásait természetesen csak rekonstruált adatsorokból lehet elvégezni. A megfigyelésekből származó főbb következtetéseket az 1.1. pontban foglaltuk össze. A megfigyelések, az idősorok empirikus-statisztikai kiértékelésének egyes módszertani kérdéseit, lehetőségeit és korlátait azonban - részletesebben - e pontban tekintjük át. Tanulmányunk témája szempontjából kiemelkedő jelentőségűek az idősor-elemzések. Ilyen vizsgálatokat végeztek többek között a légköri gázok koncentrációinak, a hatáselemzések szempontjából alapvető fontosságú éghajlati jellemzők, mindenekelőtt a felszíni léghőmérséklet és a csapadékmennyiség, a szélsőséges éghajlati jelenségek intenzitási, gyakorisági adatsoraira, vagy a tágabb értelemben vett éghajlati rendszer olyan elemeire, mint például a hó és a (tengeri) jégtakaró kiterjedése, a felszíni vízmérleg összetevői, a sugárzás jellemzői. A vizsgálatok az összes területi léptékű éghajlati paraméterre kiterjednek: egy-egy állomás adatsorára, regionálisan, hemiszférikusan, globálisan átlagolt mezőkre. Az ilyen statisztikai számítások, modellezések fő célja a különféle időskálájú változások - a hosszabbtávú tendenciaszerű, periódikus és aperiódikus változások valamint a „zaj” - felismerése és elkülönítése, a változások nagyságrendjének, a modellek paramétereinek becslése, illetve a változások becslési korlátainak feltárása. Statisztikai eljárásokkal ugyancsak vizsgálják az éghajlati elemek területi eloszlását, mezőinek szerkezetét, tovább a különféle változók közötti összefüggéseket. Kiértékelni nemcsak az empirikus úton szerzett adatokat lehet: hasonló módszerekkel tanulmányozzák a statisztikai modellekkel szimulált és a dinamikus éghajlati modellekkel előállított adatsorokat.

## Az éghajlat fogalma és a változások spektruma

A megfigyelési idősorok kiértékelésének egyik alapvető problémája az éghajlat fogalmával függ össze. Ha az éghajlatot - legelterjedtebb meghatározásával összhangban - a főbb meteorológiai elemek megfigyelt értékeinek segítségével meghatározható statisztikai sokasággal (populációval) jellemezzük, akkor tekintettel kell lennünk arra, hogy „homogén” időszakot válasszunk ki. Az ilyen időszakokon belül feltételezhető, hogy egyrészt az éghajlati rendszer külső feltételei (kényszerei) nem változtak meg lényegesen, másrészt - akár azonos külső feltételrendszer mellett is - a rendszer sem tért ki korábbi (dinamikus) egyensúlyi állapotából. E homogén időszakok meghatározása a gyakorlatban azonban nehezen megoldható kérdés, s a leggyakrabban abban a formájában merül fel, hogy milyen idősokra „átlagolják” a meteorológiai megfigyeléseket ahhoz, hogy viszonylag stabil éghajlati jellemzőket kapjanak. Emellett e kérdést gyakran egyszerűen a rendelkezésre álló idősorok hossza „dönti el” (vagy egyszerűen: korlátozza). Az említett időszak, azaz az éghajlati időskála alsó határának kijelölése koncepcionálisan azt jelenti, hogy elkülönítik az időjárási fluktuációkat és a már éghajlati jellegűnek ítélt fluktuációkat; számszerűsítve pedig, e kérdés megoldásánál egy vonatkoztatási szinthez viszonyított fluktuációk (anomáliák) „karakterisztikus” elkülönítéséről van szó (Czelnai, Götz és Iványi, 1982). Ez a megoldás lényegében igaz az egész éghajlati időskálára: a változékonyság nagyságrendi elemzését végzik el az időlépték függvényében és ennek alapján választhatók ki a különböző „karakterisztikus” időszakok. A vizsgálatok konkrét, véges idősorokra épülnek, az említett összefüggés folytonos és emiatt az éghajlati fluktuációk, ingadozások és változások időléptékeinek elkülönítése messze nem egyértelműen megoldható feladat. Az éghajlati időskála, más megközelítésben a „normál-időszakok” vagy „normálértékek”, azaz a homogén időszakok kiválasztásának problémája tehát végsősoron az éghajlat koncepciójával függ össze. Egyrészt az egyetlen realizációból számított jellemzőket az idősor jellemzőivel akkor vehetjük elvben azonosnak, ha a rendszert ergodikusként tekintjük, másrészt mindig csak véges minta áll rendelkezésünkre. Ez utóbbi ok miatt külön figyelmet kell fordítani a statisztikai becslések stabilitására. Ami pedig az ergodikusságot illeti, e felvetéssel szemben kételyek merültek fel, sőt más hipotézisek - a klímarendszer „nem tranzitív” jellegének (azaz azonos külső feltételek esetén több eltérő stabil állapot kialakulásának) - lehetősége is felvetődött (Lorenz, 1968; Götz, 1981). E problémát elvben a különböző ergodikus állapothalmazok közötti átmenet lehetőségének feltételezése - mint a klímaváltozások egy megközelítése - oldhatja fel. Az időléptékkel kapcsolatos számszerű vizsgálatokra a folyamatok - az éghajlati elemek megfigyelési adatainak - spektrál- és variancia-analízisét végzik el (Madden és Ramanathan, 1980; Wigley és Jones, 1981; Hajashi, 1982; Mobley és Preisendorfer, 1985). A felszíni hőmérsékletre vagy például a jégviszonyokra vonatkozó a paleoklimatológia eszközeivel rekonstruált adatokból a következő időszakokat különítették el: az éghajlat konkrét éveken belüli fluktuációi; az éghajlat évközi ingadozásai (10-1 és 10+1 év közötti nagyságrend); az éghajlatváltozások (szűkebb értelemben vett) tartománya tíz és tízezer éves nagyságrendek között; a jégkorszakon belüli glaciális-interglaciális változások (104 és 3x105 év között); a Föld történetének túlnyomó részére jellemző, jelentősebb (viszonylagos) változások nélküli, „egyenletes” klíma (3x105 és 107 év között); végül a jégkorszakok ismétlődésének tartománya 107 és 109 éves nagyságrendű időtartományok között, amely a jelenlegi paleoklimatológiai ismeretek szerint kiterjeszthető a Föld mintegy 4,5 milliárd éves korának kezdetéig. A rövidebb időtartományokban (különösen a műszeres meteorológiai megfigyelések időszakán belül) - nyilvánvalóan - részletesebb vizsgálatok végezhetők el. Az egyes időtartományokon belül részben (külső) éghajlatalakító tényezők változásával összefüggésbe hozható jellegzetes időszakokat, periódusokat határoztak meg. (Ezek a spektrumban lokális maximum-helyekként jelennek meg.) Az éghajlingadozások és a rövidebb idejű éghajlatváltozási jelenségek sorában a legismertebbek a kb. 11- és 23-éves egyszeres illetve kettős napfoltciklusok vagy a kvázi-kétéves cirkulációs ciklus. Ezekről eltekintve a tízezer éves időtartományig a spektrumban lényegében nem mutatható ki más „szignifikáns”, fizikailag értelmezhető, prognosztikailag hasznosítható periódus. Spektrálanalízist, periódusvizsgálatot nemcsak globális

klímaváltozókra, hanem regionális adatsorokra is végeztek; hazai adatokra többek között Koflanovits (1977), Szentimrey és Gulyás (1986).

## **Az éghajlatváltozás detektálása**

Az éghajlat jellemzése tehát időskála-függő. Ennek megfelelően két időszak klímaállapotának egybevetését a legkézenfekvőbb a két időszak átlagos jellemzőinek összehasonlításával elkezdni. Az esetleges eltéréseket viszont egybe kell vetni az éghajlatnak az időszakokon belüli változékonyságával: e „zaj”-ról viszont kiderülhet, hogy átlagos amplitudója jelentősen meghaladja a két időszak „jeleinek” különbségét. Ezzel el is érkeztünk az éghajlati változások felismerésének, detektálhatóságának egyik alapvető problémájához. Az időszakok léptékének (karakterisztikus tartamának), majd a konkrét időszakoknak a kiválasztását követően átlagos jellemzőiknek összehasonlítása hipotézis-vizsgálat elvégzését jelenti. A „klasszikus” (és idealizált) feltételektől eltérően azonban a vizsgált időszakoknak bármely jellemzője is változhat: fizikailag nem lehet leegyszerűsíteni a feladatot például a „normálértékek” módosulására a többi jellemző változatlansága mellett, a klímaingadozás maga után vonhatja a változékonyság paramétereinek változását is. Az egy-egy változóra vonatkozó - általában időbeli átlagolással végzett - „zajszűrés” és a változással kapcsolatos hipotézisvizsgálatok mellett, megkísérlik feltárni az idősor különféle összetevőit. E célra idősor-modelleket vezetnek be. A különféle okokra visszavezethető és az idősorokban különféleképpen jelentkező hatások „összeadódnak”, az egyes hatások elkülönítése rendkívül összetett feladat. Akár a periodikus jellegű hatások, akár a statisztikai értelemben fehér zajnak tekinthető összetevők - a már említett - megfelelő átlagos időszak megválasztásával meghatározhatók illetve elkülöníthetők. E célból szokásosan spektrálanalízist végeznek. Ezzel párhuzamosan vagy ezt követően becsülik az idősor-modell paramétereit külön-külön az összehasonlítandó időszakok adataiból (Mearns et al., 1984). A többparaméteres közelítések előnye az, hogy - feltételezhetően - pontosabban írják le a változók viselkedését, időbeli menetét, ugyanakkor a modellek esetleges téves „előfeltételezéseket” tartalmazhatnak és a paraméterek növelésével csökkentik a becslések szabadsági fokainak számát. A feltételezett egyirányú változások vizsgálatára különféle trend-modelleket alkalmaznak. E modellekben figyelembe veszik a már említett változékonyságot is: többnyire vagy - a megfelelő karakterisztikus időszakokra - simított (illetve az egyéb hatások kiszűrésével „előfehérített”) idősorok előállításával, vagy a trendmodellek kiterjesztésével (Poljak, 1985). E modelleket gyakran leszűkítik az egyszerű lineáris - esetenként a magasabbfokú polinomiális - trendelemzésekre. A trend fogalma és modellje azonban nagymértékben általánosítható: töréspontok vezethetők be (Solow, 1987; Hanson et al., 1988), nem-paraméteres („robustus”) trendek határozhatók meg iterációkkal (Cleveland, 1979), az általánosított közelítő trendfüggvény a tényleges idősor vetületeként is felfogható (Szentimrey, 1989). Trendelemzéseket végeztek különféle regionális és globálisan átlagolt hőmérsékleti adatsorokra, tengerfelszín-hőmérsékletekre, a jégtakaró kiterjedésére, csapadék és légnyomás adatsorokra és számos további meteorológiai változóra (Barnett, 1984; Karl, 1986; Koflanovits, 1974; Golitsin, 1986; Mobley és Preisendorfer, 1985; Szentimrey, 1989; Hanson et al., 1989). Jelenleg a legnagyobb jelentősége a hemiszférikus vagy globális felszíni hőmérsékleti adatsorok vizsgálatának, a pozitív trendre vonatkozó feltevés igazolásának (vagy elvetésének) van (Vinnikov et al., 1987; Jones et al., 1986). E vizsgálatoknál is az alapvető módszertani kérdés a változás-detektálással kapcsolatos hipotézisvizsgálat (Epstein, 1982). A statisztikai vizsgálatok között külön említést érdemel a szélsőérték-analízis. Az éghajlat trendjellegű változása és/vagy „változékonyságának változása” (Mearns et al., 1988) egyaránt hatással van az éghajlati változások szélsőséges értékeinek gyakoriságára. A szélsőséges értékeket, éghajlati jelenségeket itt tágabban értelmezik: azok sorába beleértik a „rekordértékeket”, a „rendkívül” magas vagy alacsony (valamilyen küszöbértéket meghaladó vagy azt el nem érő) értékek gyakoriságát, illetve a viszonylag tartós anomáliákat. Az ilyen események jelentőségét növeli, hogy heurisztikusan azok megjelenése irányítja rá sokszor a figyelmet az éghajlat állapotának esetleges megváltozására. Számos újabb modellezési, matematikai problémát vet fel a

szélsőértékek jellemzőiben kimutatható eltérések alkalmazása az éghajlat változékonyságának, esetleges változásának kimutatására (Hoyt, 1981; Mearns et al; 1984; Parry, 1985). A statisztikai változás-detektálás és a modellillesztések problémáját, a probléma összetettségét jól példázzák az elmúlt évtizedek többé-kevésbé ellentmondó becslései. Az elmúlt egymillió évben közel 70-120 ezer éves periódussal glaciális és (lényegesen rövidebb idejű) interglaciális időszakok következtek egymás után. E természetes hosszúidejű változékonyságnak és annak a ténynek a figyelembevételével, hogy a jelenlegi interglaciális időszak mintegy 10-15 ezer évvel ezelőtt kezdődött, több kutató a 70-es években még azt „prognosztizálta”, hogy a jelenlegi viszonylag meleg interglaciális időszak végéhez közeledik; e feltevés megerősödésében - megalapozatlan - szerepet játszott a hozzávetőlegesen az 1930-as és 1960-as évek közötti meleg időszakot követő lehülési tendencia (Boriszenkov, 1976). Ebben az időszakban az antropogén éghajlatmódosító hatások nagyságrendje, szerepe még nem kapott kellő hangsúlyt. Néhány év elteltével (döntően az 1. Éghajlati Világkonferencia után) már a globális melegedés hipotézise vált uralkodóvá (NDU, 1978; Federov, 1979; Flohn, 1979); a későbbi megfigyelések birtokában már úgy látszik, hogy a globális hőmérséklet emelkedése a 60-as évek közepe óta tart, s ez a tendencia érvényes - ha nagyobb ingadozásokkal is - az elmúlt 100 éves idősakra (Vinnikov, 1986). E problémák arra is rámutatnak, hogy a becslések csak feltételes prognosztikai értékkel rendelkeznek, az éghajlat előrejelezhetősége pedig alapvetően megoldatlan kérdés.

Az éghajlati időskála választásának problémája mellett - de attól nem függetlenül - jelentkezik a területi átlagolás kérdése is. A lokális éghajlatmódosító hatások miatt egy-egy konkrét földrajzi területre vonatkozó megfigyelések csak áttételesen tartalmazzák a globális változékonyság vagy az esetleges globális változás hatásait. Egyrészt a helyi hatások lényegesen intenzívebbek is lehetnek (például földrajzi sajátosságok, vagy antropogén hatások miatt), másrészt a klímarendszer globális állapota a globális légköri cirkuláció, vagy például a feltételezett globális felmelegedés) területenként eltérő jellegzetességekkel rendelkezik. A helyi hatások kiküszöbölése érdekében az empirikus-statisztikai vizsgálatokban globálisan vagy regionálisan átlagolt éghajlati jellemzőkkel számolnak. A gyakorlatban e kérdés megoldása is számos nehézségbe ütközik: a műszeres megfigyelések időszakában például a mérési technika számtalanszor módosult, nagy területekről (például az óceánok térségéből) alig vannak felszíni adataink, az állomások jelentős része olyan lakott települések környezetében van, ahol a mérési eredményeket a helyi klíma változása (a városi hatás) alapvetően befolyásolja (Karl et al., 1988). A helyi (regionális) és a globális hatások szétválasztása is nehezen kezelhető probléma.

## **Az éghajlati szimulációk, scenáriók**

Az éghajlati idősorokat különféle statisztikai modellekkel közelíthetik; e modellek lehetővé teszik szimulációk elvégzését, azaz szimulált adatsorok előállítását. E vizsgálatokból kitűnik, hogy „szokatlan események” (átmeneti trendek, látszólagos periódusok) akkor is megjelenhetnek, ha azok nem a sztochasztikus modell részei (Karl, 1988). E modellekkel is végezhetők érzékenységi vizsgálatok és az eredetileg rögzített - a megfigyelt adatokból becsült - kiindulási paramétereik változtatásával éghajlati scenáriók származtathatók. A globális scenáriókból kiindulva speciális éghajlati jellemzők feltételes értékei is levezethetők ezen a módon. Empirikus modellnek, modellezésnek tekinthető az a közelítés is, amikor különböző kritériumok alapján múltbeli analógiákat (analóg időszakokat) választanak és ezek jellemzőivel szimulálnak első- vagy másodfajú prognózisokat. A numerikus éghajlati modellekkel kapcsolatban is felmerül eredményeik statisztikai kiértékelésének problémája. Ez a kérdés egyfelől - a végezzék számú modelleredmény miatt - az előrejelezhetőségi, érzékenységi vizsgálatokkal, másfelől a klímarendszernek - a már említett - tranzitivitási problémáival függ össze (Lorenz, 1968; Czelnai, Götz és Iványi, 1982). A klímamodellek numerikus-statisztikai kiértékelése - az egyre jobb számítástechnikai lehetőségek ellenére - újabb és újabb módszertani kérdéseket vet fel (Livezey, 1985; Mearns et al., 1988).

## Globális és regionális változások

Az általános klímamodellekkel kapcsolatos a statisztikai közelítéseknek egy további alkalmazása: az éghajlat globális és regionális jellemzői közötti összefüggések feltárása. E feladat megoldásának döntő jelentősége van az első- és másodfajú globális éghajlati prognózisok „regionalizálásában”, azaz az egyes meteorológiai elemek felszíni eloszlásának becslésében. (A globális éghajlati modellek felbontóképessége ugyanis - többek között számítási okokból - korlátozott.) Általában empirikusan vizsgálják a közelmúlt vagy a régebbi korok globális és regionális éghajlati folyamatainak egyidejű kapcsolatát (Webb és Wigley, 1985; Vinnikov, 1986). E megoldás hátterében az a feltételezés áll, hogy a globális klímaváltozás regionális eloszlása csak a globális változás mértékétől függ, az azt kiváltó külső tényezők és belső igazodási folyamatok konkrét alakulásától nem. E - végsősoron nem bizonyított - feltételezés alapját azok az általános cirkulációs modellekkel végzett, egyensúlyi vizsgálatok (Manabe and Wetherald, 1980, Hansen et al., 1984) képezik, melyek szerint a modellekben szimulálható több fokos változások tartományán belül a regionális változások zonális és vertikális eloszlása hasonló, függetlenül attól, hogy milyen külső kényszer váltotta ki a globális változást. Az így kapott térbeli eloszlásokhoz hasonló képet mutat néhány paleoklimatológiai rekonstrukció (pl. Fairbridge, 1967, Borzenka és Zubakov, 1983) is. A globális klímaváltozások regionális sajátosságainak becslésére több módszer ismeretes. A legtöbb vizsgálat természetesen a műszeres mérések mintegy száz-kétszáz éves időszakára történt. E módszer előnye, hogy a csillagászati és felszíni határfeltételek kevéssé különböznek a jelenlegiektől illetve a közeljövőben várható viszonyoktól. Hátránya viszont, hogy szigorúan véve csupán a már végbement kb. 0,6 fokos változások tartományán alkalmazható. Emellett egyes időszakokban a félgömbi átlagos adatsorokat a lassú változásokkal összemérhető hibák terhelhetik. A nagy évközi ingadozás miatt a „modell” statisztikai illesztése csak időben kiátlagolt (simított) adatsorokra lehetséges. Különböző megfontolásokból a mintavételt leszűkíthetik például szélsőséges éghajlatú vagy „egyensúlyi” időszakokra. Az előbbi megoldás szerint az átlagos hőmérsékleti adatokból vagy az ennél többszörösen érzékenyebben reagáló poláris térségek adataiból szélsőségesen hideg illetve meleg éveket választanak ki, s e csoportok regionális középértékeit hasonlítják egymáshoz, vagy az átlagos viszonyokhoz (Williams, 1980, Jäger és Kellog, 1983). E megoldás hátránya, hogy a fokozatos klímaváltozásnál egy nagyságrenddel rövidebb időskálán fellépő, a megelőző állapottól is erősen függő, az aktuális éghajlati kényszerhez még részben sem igazodott állapotok összehasonlításáról van szó. Egy másik módszer szerint egymás utáni évekből álló, hosszabb időszakokat hasonlítanak össze, melyek globális átlaghőmérséklete a lehető legjobban eltér egymástól. (Lough et al., 1983, Pittock és Salinger, 1982). Az eljárás az évtizedet meghaladó átlagolás esetén már megfelelő, azonban a csupán két adategyüttesből való extrapolálás feltételezi a globális illetve regionális átlagok közötti egyváltozós kapcsolat lineáris voltát. Az említett idősorok kvázi-egyensúlyi kritérium szerint is kiválaszthatók (Boncz és Mika, 1983; 1984). Végül megemlítjük az instrumentális változók módszerét (Vinnikov és Grojszman, 1979; Kovüneva, 1984).

Az éghajlat változékonyságának és változásának vizsgálatára alkalmazott statisztikai eljárásokkal az idősorok empirikus-statisztikai elemzése tehát csak kellő körültekintéssel végezhető el: a vizsgálatok - ha másképpen is mint például a dinamikus éghajlatmodellek esetében, de - valamilyen feltételezésekre, hipotézisekre épülnek (az idősor modelljének választása), a kérdéses feltételek érvényességének ellenőrzése csak korlátozottan lehetséges (hiszen egyetlen realizációt ismerünk), s mindezek figyelembevételével következtetéseink, esetleges prognózisaink is csak feltételesek lehetnek. Ez utóbbi értelemben a „statisztikai” és a „dinamikus” közelítések is modellfüggőek, más megközelítésben pedig kiegészítik egymást. A statisztikai modelleket sokszor leegyszerűsítve szemlélik és szembeállítják a dinamikus (vagy akár az energia-egyensúlyi) modellekkel. Valójában a statisztikai modellek is kiterjeszthetők úgy, hogy leírják a vizsgált rendszer belső összefüggéseit és fejlődését, illetve a „determinisztikus” modellekbe is be lehet vezetni a sztochasztikus „zajt” leíró tényezőt. Az ilyen általánosított modellek numerikus megoldása azonban újabb problémákat vet fel.

## 2.3. AZ ÉGHAJLAT MODELLEZÉSE ÉS A MODELLEK ALKALMAZÁSÁNAK MÓDSZERTANI KÉRDÉSEI

Az éghajlatkutatás egyik leghatékonyabb eszköze a modellezés. A modellek alkalmazási lehetőségeinek és korlátainak megértéséhez világosan kell látni a modellezés koncepcionális és módszertani alapjait, az éghajlati modellek lényegét, valamint a numerikus modellek gyakorlati alkalmazásának feltételeit. Az elmúlt évtizedekben a modellek egész hierarchiája alakult ki; az egyes modellek különböznek többek között abban, hogy milyen mélységben írják le a klímarendszer folyamatait, fizikai összefüggéseit, milyen a tér- és időbeli felbontóképességük. Az éghajlati modelleket mindenekelőtt az éghajlat szimulálására, előrejelzésére, éghajlati scénáriók készítésére alkalmazzák. Eredményeiknek döntő jelentősége van az éghajlati folyamatok értelmezésében vagy a különféle hatástanulmányok elvégzésében.

### AZ ÉGHAJLAT ELŐREJELEZHETŐSÉGE

A légköri folyamatok tetszőleges pontosságú és időtartamú előrejelzésének számos elvi, módszertani és gyakorlati akadály van. A jövő megismerésének lehetőségei, az előrejelzés módszerei iránt mind szakmai körökben, mind pedig a „felhasználók” részéről mindig is óriási érdeklődés nyilvánult meg, s különösen a modellezéssel kapcsolatban sokszor megalapozatlan elképzelések, elvárások is kialakultak. Ezért, mielőtt a modellek fejlesztésének eddigi főbb eredményeit, időszzerű kérdéseit, alkalmazási lehetőségeit áttekintenénk, vegyük sorra az éghajlat - vagy tágabban, az éghajlati rendszer - állapotának, változásának előrejelzési korlátait. Az éghajlat előrejelezhetőségének mindenekelőtt több alapvető, objektív - magukban a természeti folyamatokban gyökerező - korlátja van. Legelsőként az éghajlat „majdnem intranzitív” jellegét említhetjük (Lorenz, 1968). Azokat a („dinamikai”) rendszereket nevezik így, amelyeknek azonos külső feltételek mellett - átlagos időbeli jellemzőit tekintve - több stabil állapotuk lehet, de az egyes állapotok igen hosszú ideig fennmaradhatnak. Az ilyen rendszer tehát a különböző statisztikai jellemzőit hosszú időn át megőrzi, majd áttér egy másik hasonló értelemben stabil állapotba. A közelmúltban Götz (1988) összefoglalta azokat az 1973 óta elért kutatási eredményeket, amelyekkel az egyenél több stabilis klíma létezésének hipotézisét igazolták. Ezt a jelenséget Lorenz úgy magyarázza, hogy a légköri folyamatokat leíró törvények nem determinisztikusak. Az ilyen „instabilitásnak” már a modellezés keretében, módszertani okai is lehetnek: a fizikai törvényeket mindig csak bizonyos elhanyagolásokkal írjuk le. Ezen kívül létezik még a megfigyelésekkel, a megfigyelési rendszerrel is összefüggő ok, miszerint mégha a vizsgált rendszer, a légköri, éghajlati folyamatok fizikai törvényei determinisztikusak is lennének és pontosan ismernénk azokat, akkor is keletkezne pontatlanság a számítások megkezdéséhez szükséges „kezdeti” értékek hiányos ismerete, azaz az észlelt adatok diszkrét jellege, a megfigyelőhálózat egyenetlen eloszlása miatt. De ha pontosan tudnánk még a kezdeti feltételeket is, akkor sem lennének képesek térben és időben folytonos adatmezőkkel, hiba nélkül számolni a numerikus módszerek és a számítógépes számábrázolás közelítései miatt. Az éghajlati rendszer több, a számítások szempontjából egymással összefüggő problematikus tulajdonsággal rendelkezik: instabil abban a tekintetben, hogy a kezdeti mező kis különbségei fokozatosan növekednek, az eltérések nem lineárisak, a mikroskálák kezdeti perturbációi idővel áttérjednek a nagyobb térbeli léptékű folyamatok tartományába. Már Lorenz a Benard-konvekció leírása során olyan nemlineáris egyenletrendszer kapott, amely a fázistérben az egyenletrendszer paramétereinek a függvényében konvergálhatott egy pontba (azaz nem volt érzékeny a kezdeti adatok változására), illetve divergált (amikor a kezdeti adatok kis megváltoztatása teljesen más eredményt adott). Ez az egyenletrendszer az ún. Lorenz-féle különös attraktor. E közelítést és a vele kapcsolatos elméletet azóta jelentősen általánosították. Az eddigiekből következik, hogy az általános cirkulációs modellekkel elvileg sem készíthető tetszőleges pontosságú és időtávú globális éghajlati előrejelzés egyrészt a légköri folyamatok sztochasztikus jellegének problémái miatt, másrészt a modelleknek a fizikai folyamatok paraméterezésével és a numerikus korlátokkal kapcsolatos érzékenysége miatt. Az általánosabb éghajlati modellek különböző mértékben tartalmazzák a

mozgástörvényeket leíró egyenleteket. A Navier-Stokes egyenletre azonban egyidejűleg nem sikerült bebizonyítani az egzisztenciát és az unicitást. A makrotérsgű légköri folyamatokra tehát több egyensúlyi megoldást vezethetünk le az adott parciális differenciálegyenleteket tartalmazó modellben. A fentiekkel összhangban ez azt jelenti, hogy egy és ugyanazon külső feltételrendszer mellett több stabil vagy ciklikus megoldás lehetséges. Emellett a külső kényszerek is további bizonytalanságot visznek a rendszerbe, ami a hő- (energia-) források leírásánál vagy a viszkózus erők megadásánál jelentkezhet. Ez utóbbi azért is fontos, mert a disszipációs folyamatokon keresztül jelentős a szerepük az energia eloszlásában, az energiaspektrum kialakításában. Az előrejelezhetőség problémája az egyszerűbb klímamodelleknél is megjelenik. (Egyes modellekben, például, ugyanazon feltételek mellett a jelen éghajlati állapot mellett létezik még egy stabil állapot az ún. „fehér Föld” állapot, azaz amikor az egész Földet hó és jég borítja.) Ezekben az esetekben a modell érzékenysége általában a kevés visszacsatolás miatt túlzott, az instabilitás nem feltétlenül a paraméterek értéke miatt lép fel, hanem a paraméterek egymás közti viszonya miatt, ezért lehetséges, hogy nem is a fizikai folyamatokat jellemzi, hanem a modell sajátossága. Történtek kísérletek más elveken alapuló modellezésre, hogy a fenti hiányosságokat elkerüljék. Ilyen lehetőség például a légköri folyamatok statisztikus jellemzőin alapuló módszer, amely a turbulenciaelmélettel, Friedman-Keller egyenlettel analóg; az általános cirkulációra jobban ható területek kiválasztása, és térben, időben átlagolt hatásfüggvények alkalmazása; az éghajlati rendszer kváziperiodikus, vagy lassan változó részének előrejelzése, amelynek segítségével meghatározható az éghajlati rendszer többi paramétere; a Nap-Föld kapcsolatok statisztikus leírása; a Föld elektromágneses mezejét és ennek hatásait figyelembevevő modell; a minimális entrópiacserére épülő közelítés.

## **AZ ÉGHAJLATI MODELLEK**

### **A klímamodellek tulajdonságai**

A modellezés célja, hogy megértsük az éghajlatot, viselkedését és meghatározzuk a természetes és antropogén klímaváltozásokat. Ahhoz, hogy egy modell alkalmazható legyen ezekre a célokra, az alábbiak szükségesek:

- Zártság. A modellben nem szabad a priori megadni (input adatként kezelni) olyan meteorológiai mezőket vagy összefüggéseket, amelyek a klímaváltozás során jelentősen megváltozhatnak. Belátható, hogy teljes zártság nem lehetséges, ezért ki kell választani egy ésszerű zártsági szintet, azaz meg kell állapítani, hogy mely tényezőket kezelünk külső hatásként („kényszerként”). Ez függ a vizsgált időléptéktől, ismereteink szintjétől, számítástechnikai lehetőségeinktől.

- A részletes elemzés lehetősége. A modell megvalósítása során törekedni kell arra, hogy ne csak a számított mezők legyenek analizálhatók, hanem azok különböző karakterisztikái is.

- Pontosság. A modell pontossága feleljen meg a kitűzött feladat szerint elvárt pontosságnak. Ez azt jelenti, hogy a különböző éghajlati sajátosságok vizsgálatánál a kapott eredmények lényegileg nem változnak, ha a belső paraméterek illetve a felhasznált összefüggések az ismert pontosságuk mértékén belül ingadoznak.

- Az alapvető visszacsatolások leírása. A későbbiek során kitérünk még azokra a hatásláncokra, amelyek alapvetően meghatározzák az éghajlati képet, és amelyeket a modellben figyelembe kell venni.

- Verifikáció. Mielőtt áttérnénk a jövő éghajlatának vizsgálatára, szükséges a modell ellenőrzése egy ismert adatbázison; speciálisan az adott modellel szimulálják a „jelenlegi” éghajlatot és az eredményeket egybevetik a megfigyelt adatokkal.

### **Az éghajlati modellek hierarchiája**

a/ Egyes éghajlati tényezők vizsgálatára készült modellek. Ezek olyan egyszerű modellek, amelyek a klíma, vagy valamely komponense változására adnak becslést. Leggyakrabban a légkör termikus rendszerét vizsgálják a külső tényezők megváltozása esetén. E modellek előnye, hogy a segítségükkel



kapott, és az adatbázison ellenőrzött összefüggések, becslések jó összehasonlítási alapot nyújtanak bonyolultabb modellek ellenőrzéséhez. Így át lehet tekinteni egyes fizikai mechanizmusok vizsgálatának lehetőségét összetettebb modellekben, de az elhanyagolások miatt nincs szigorúan vett alapunk annak feltételezésére, hogy a felhasznált empirikus kifejezések egy klímaváltozás során is állandóak maradnak. Másrészt a pontosságuk nem kielégítő ahhoz, hogy az így kapott becslésekre hatáselemzéseket, alapvető döntéseket alapozzanak.

b/ Az átlagolt egyenleteket felhasználó modellek. A meteorológiai elemek klimatikus eloszlása kétféle módon állítható elő: vagy az eredményül kapott mezők statisztikai feldolgozásával, vagy eleve átlagolt egyenletekkel, változókkal. Az első módszer nagy követelményeket állít az alkalmazott numerikus módszer és a felhasznált számítógépes kapacitás elé. A második módszerrel lehetséges stacionárius és nemstacionárius feladat kitűzése is. Az átlagolás történhet térben és időben. Az előbbi a fizikai folyamatokat a modell „felbontása alá viheti” (gridmodelleknél, azaz amikor a feladatot rácshálózaton oldjuk meg), ami azt jelenti, hogy növekszik a szubgrid-skálájú folyamatok száma, azaz nőnek a paraméterezésük nehézségei, egyúttal megjelenik az ún. lezárási probléma. (Ez utóbbi megoldása arra irányul, hogy az egyenletrendszerben az egyenletek és az ismeretlenek száma megegyezzen; amihez még valamilyen további statisztikus-empirikus összefüggést kell felhasználni.) A térbeli átlagolások a következők lehetnek. Globális átlagolás: ilyenkor a dinamikus folyamatoktól eltekintünk, a rendszert döntően a termikus (termodinamikus) folyamatok jellemzik; szélességi körök szerinti, vagy zonális átlagolás: ekkor a zonális mennyiségek nemlineáris dinamikus hatását vizsgál(hat)ják, a nemzonális dinamikus folyamatok csak parametrizáltan jelennek meg, a döntő szerep a termodinamikus folyamatoké (a zonális átlagolás fizikai alapját az adja meg, hogy a légkör felszínére érkező napsugárzás zonálisan szimmetrikus). Átlagolt, nemzonális modell, linearizált mozgásegyenletekkel: a linearizálás vagy a zonális cirkulációra vonatkozik és ekkor az impulzus zonális átvitelét vizsgálják, a hullámok nemlineáris kölcsönhatását pedig paraméterezik, vagy az alapmozgást linearizálják és így megjelennek zonális és nemzonális komponensek. Nemlineáris, nemzonális modell átlagolt mennyiségekkel: ekkor a nemzonális perturbációk szubgrid hatását parametrizálják.

c/ A klímaváltozások vizsgálata a perturbációk módszerével. A perturbáció-elmélet módszere lehetővé teszi a légkör és az óceán teljes egyenletrendszerének, mint alapnak és a hozzákapcsolt egyenletrendszernek a megoldását. Az alap- és a kapcsolt rendszerre négydimenziós általánosított funkcionálokat építenek, amelyek lehetőséget adnak a légkör és az óceán különböző átlagolt paramétereinek meghatározására. Kiválasztva egy alap-egyenletrendszert, a perturbációk módszerével funkcionálokat kaphatunk a légköri és óceáni klímaparaméterek változására. Az átlagolás térbeli és időbeli léptékét variálva lehetséges a légkör és óceán anomáliáinak vizsgálata, mint az alapvető éghajlati és általános cirkulációs faktorok függvénye, és amelyek hosszútávon integrálódnak olyan súlytényezőkkel, amelyeket a kapcsolt rendszer határoz meg. Mivel a kapcsolt és az alaprendszer struktúrájában és tulajdonságaiban megegyezik, ezért itt hasonló problémák lépnek fel, mint az alaprendszer integrálásánál.

d/ Háromdimenziós hidrodinamikai modellek. Ilyen modellek alatt az óceán és a légkör háromdimenziós modelljeit értjük, amelyek nemstacionáriusak és nemadiabatikusak, és amelyek egzakt módon leírják a szinoptikus méretű hullámokig a perturbációkat. Részletesen tartalmazzák olyan fizikai folyamatok leírását, mint a sugárzásátvitel, hő- és nedvességcsera, a nemadiabatikus hőforrások. A szubgrid folyamatokat paraméterezik, számítják a felhőzetet és a felszíni hőmérsékletet. Az óceán esetében a teljes hidrodinamikai egyenletrendszert vizsgálják, figyelembe véve az óceáni cirkulációra ható összes alapvető tényezőt.

e/ Hidrodinamikai-statisztikai modellek. E modelleket tovább osztályozhatjuk az alábbiak szerint.

- A makroturbulencia alkalmazása. Ha a modell túlságosan kicsi felbontóképességű, szükséges a szubgrid folyamatok paraméterezése, amelyre egy lehetőséget ad a makroturbulencia bevezetése. A második momentumok kifejezése történhet többféle módon: (i) az átlagolt mennyiségek gradienseivel és a makroturbulencia együtthatóival, amelyeket úgy határozzunk meg, hogy a kialakult klímakép a legjobban közelítse meg a valóságot, de ezúttal sem szabad elfelejteni, hogy egy esetleges változáskor megváltozhatnak ezek az együtthatók is; (ii) a második momentumokra új egyenletek bevezetése a

turbulencia statisztikus elmélete segítségével; (iii) az alapáramlás és a fluktuációk szétválasztása úgy, hogy köztük a kölcsönhatás minimális legyen.

- A légköri dinamika leírása a statisztikus mechanika egyenleteivel, és a Monte-Carlo módszer segítségével. Ez a bonyolult módszer lehetőséget nyújt az előrejelzés határozatlanságának vizsgálatára. Fel kell tenni, hogy a légköri dinamika törvényei egyértelműen meghatározzák adott kezdeti feltételek mellett a légkör viselkedését. Az eredmény nem egy állapot (egy időpontban) hanem a fázistérben egy valószínűségi sűrűségfüggvény. Problémát okozhat, hogy néhány paraméter mezeje töréses (pl. albedó). A Monte-Carló módszer rugalmasabb, főleg ott hatásosabb, ahol nagy szabadsági fokú rendszerekről van szó. Ezek a kutatások kezdeti szakaszban vannak.

- A légköri mozgások nagyfrekvenciás komponenseinek statisztikus parametrizációja a nemlineáris mechanika aszimptotikus módszereinek segítségével. Ennek a módszernek az alkalmazása is a kezdeti stádiumban van. A módszer a légköri dinamika egyenleteit alakítja át, amely átalakítás a meteorológiai elemek mezőinek általánosított gömbfüggvények szerinti és egy független változó differenciáloperátorának sajátvektorai szerinti sorfejtésén alapul. Így az átalakított rendszer egymással csak gyengén kapcsolatban álló közönséges differenciálegyenlet-rendszerekre esik szét, amelyekre már alkalmazható a nemlineáris mechanika aszimptotikus módszere.

## **A modellek tér- és időbeli skála szerinti osztályozása**

A modellek osztályozhatók az általuk leírt folyamatok térbeli és időbeli léptéke szerint. Térbeli lépték szerint lehet lokális, regionális, félgömbi vagy globális modell. Időbeli lépték szerint megkülönböztetik a néhány perctől néhány napig terjedő karakterisztikus légköri folyamatokat leíró modelleket (időjárási modellek), a néhány naptól néhány hétig terjedő modelleket (hosszútávú előrejelzési modellek) és a hosszabb időskálájú folyamatokat vizsgáló modelleket (éghajlati modellek). Ezen utóbbiaknál a vizsgált tartomány elérheti a néhány ezer évet. Saltzman a modelleket felosztotta statisztikus-dinamikus modellekre (a változók az éghajlat statisztikai karakterisztikái, legalább hónapos átlagolási idővel) és dinamikus modellekre (szinoptikus léptékű változók szerepelnek, azaz az átlagolás nem haladja meg a fél órát).

## **Az éghajlati rendszer modelljei**

A modellezés kiterjedhet a teljes éghajlati rendszerre is. Az általánosított modellek osztályozása (aszerint, hogy az éghajlati rendszer mely elemeit tartalmazzák) a folyamatok karakterisztikus időin keresztül kapcsolatban áll az időlépték szerinti osztályozással. Léteznek tisztán légköri modellek, amelyek a klímarendszer többi elemét, azok változásait egzakt módon nem veszik figyelembe. Mivel az így elhanyagolt folyamatok jelentős nagyságrendűek, ezért ezek a modellek csak egyes légköri folyamatok vizsgálatára, vagy ultrarövidtávú előrejelzésre alkalmazhatók. Ismeretesek ezen kívül légkör-földfelszín, légkör-óceán, légkör-óceán-krioszféra modellek.

## **A modellekben alkalmazott matematikai módszerek**

A modellben alkalmazott matematikai módszer szerint megkülönböztethetünk:

- hidrodinamikai modellt, amelyben a hidrotermodinamikai egyenletrendszer szerepel, esetleg különböző egyszerűsített formájában
- dinamikus-statisztikus modellt, amelyben a hidrotermodinamikai egyenletrendszert együtt alkalmazzák a statisztikai módszerekkel a fizikai folyamatok leírására
- statisztikus modellt, amelyben csak a statisztikus kapcsolatokat veszik figyelembe.

A modellek numerikus megoldására alkalmazott megoldási módszer szerint ismerünk: analitikus, véges-differenciás és spektrális modelleket. A hidrodinamikai egyenletek megoldása során egyre inkább előtérbe kerül ezen utóbbi modell típus több előnyös tulajdonsága miatt.

## **A modellek geometriai szabadsági fokai**

A legáltalánosabban alkalmazott és legrészletesebb modellosztályozás a geometriai szabadsági fokok szerint történik. Ezek alapján az alábbi típusokat lehet megkülönböztetni.

a/ Nulldimenziós modellek. A Föld energiaegyensúlyát írják le. Általános esetben a beérkező napsugárzásnak és a Föld-légkör rendszer hosszuhullámú kisugárzásának az egyensúlyát adják meg. Egyszerű visszacsatolások figyelembe vehetők, pl. a rendszer hőtározó képessége, vagy szárazföld, tenger és jégfelszín szerinti bontás. Nulldimenziós modellekhez sorolható még a hasonlósági elv alkalmazásával nyert modellek, amelyek a légkör átlagos jellemzőit írják le több külső, dimenzionált paraméter segítségével.

b/ Egy- és kétdimenziós modellek. Az egydimenziós modelleket aszerint különböztethetjük meg, hogy a koordinátatengelyük milyen irányban van, horizontálisan, vagy vertikálisan. Ha horizontálisan, akkor lehetnek: (i) energiaegyensúlyi modellek (EEM), amelyek a felszín hőegyensúlyának leírásán alapulnak, (ii) barotróp statisztikus-dinamikus modellek, amelyek a légköri dinamikát írják le. E modellek fejlesztése során az energiaegyensúlyi modelleknél külön-külön megjelennek szabadsági fokok a felszínre és a légkörre, így lehetővé válik a dinamikus folyamatok paraméterezése; dinamikus folyamatok esetében a légkör szétbontása két rétegre, és így a kétszintes baroklin modellek bevezetése, amelyekre a felszíni feltételek adottak. Az EEM fizikai alapját az szolgáltatja, hogy az éghajlati rendszer elsődleges energiaforrása a besugárzás, amely közelítőleg zonális övezeteket hoz létre. Ilyen modell típusnál különös jelentősége van a földközeli léghőmérséklet számításának, az energiamegmaradás tételéből kiindulva. Ez a típus hasznos a hőmérséklet és az albedó szélességi körök szerinti eloszlásának, és kölcsönhatásuk vizsgálata számára. Ha parametrizáljuk az energia és a hőmérsékleti mező horizontális eloszlását, akkor megkaphatjuk a hőmérsékleti mező horizontális változását. Ha a meteorológiai elemek szélességtől és hosszúságtól való függését vizsgáljuk, azaz a modellt kétdimenziósra bővítjük, megállapíthatjuk, hogy a hosszúság szerinti változás a szárazföld és a tenger mentén nem kevesebb, mint a szélesség szerint, de nehezebb modellezni. Ezt a nehézséget háromféle úton is megkísérelték leküzdeni: a modellben megadják a szükséges paramétereket (felhőzet, nedvesség stb.); a szárazföld és a tenger hőmérsékletét szélességenként vizsgálják; a légköri és az óceáni hőtranszportot a szélességek és a hosszúságok mentén horizontális kicserélődési együtthatókkal paraméterezik, figyelembe véve az átlagos szelet és a szél által keltett tengeráramlásokat. A zonálisan szimmetrikus dinamikus modellek egyes vélemények szerint a kisebb számítástechnikai lehetőséggel bíró helyeken jól helyettesítik a háromdimenziós modelleket. Az ebbe az osztályba tartozó modelleket tovább csoportosíthatjuk, az energiaforrások paraméterezése és input adatként kezelése szerint:

- A forrásokat adottként kezelik. Ezek a források egy meridionális cirkulációt tartanak fent, amely a források átrendeződéséhez vezet. A számítások addig folynak, amíg létre nem jön a hidrosztatikus és a geosztrofikus egyensúly a földfelszíni nyomás, hőmérséklet és zonális szél között. A külső hő- és impulzusforrásokat egymástól függetlenül lehet bevezetni, ha az egyenletekben a megfelelő tagok szerepelnek. A turbulens áramok paraméterezésére zonális karakterisztikákat használnak.

- Összekapcsolják a turbulens hő- és impulzusáramokat. Erre a turbulens hőáram differenciálegyenletét használják, amely a hőforrások megfigyelt eloszlásától függ.

- Feltételezik, hogy a hőforrások egy része az átlagos zonális hőmérséklettől, az átlagos zonális impulzusforrások egy része pedig az átlagos zonális széltől függ. Ilyen módszerrel határozták meg a zonális turbulens trópusi hő- és impulzusáramok szerepét a zonális szelek, a hőmérsékleti mező formálódásában és a trópusokról a közepes szélességek felé tartó meridionális cirkuláció kialakulásában.

Mivel az átlagos zonális csapadék képződése során jelentős mennyiségű hőátalakulás megy végbe, ezért ezt a hidrológiai ciklus segítségével fejezték ki, amely utóbbit a meridionális cirkuláció, hőmérséklet és felszínközeli szél, valamint az óceán hőmérsékletével paramétereztek. Megkísérelték ebbe a modell típusba is beépíteni a felszín hőegyenlegét és ezáltal a turbulens hő- és impulzusáramok

paraméterezését javítani. Általában feltesszük, hogy mivel a baroklin hullámokra a meridionális hőmérsékleti gradiens hat, ezért egyszerűbb a turbulens áramokat arányosnak tekinteni ezzel a gradienssel.

c/ A földfelszín-légkör zonális szimmetrikus modelljei. Az előző két modelltípus ismeretéből logikusan következik a két modellfajta egyesítésének az igénye. Ehhez az alábbiak voltak szükségesek: a felhőzet, a nedvesség, a latens hőfelszabadulás vertikális szerkezetét összefüggésbe kellett hozni az átlagos széllal és az átlagos hőmérsékleti mezővel, a modell-krioszférát a modell hidrológiai ciklusával és az átlagos zonális állapot turbulens áramait valamint az óceán hőmérsékletét a felszíni hőegyenleggel és a légkör átlagos zonális állapotával. (MacCracken, 1973) A vertikális koordinátát tartalmazó horizontálisan átlagolt egydimenziós modellekben a horizontális koordináta hiányzik, azaz az ilyen irányú átvitel hiányzik. Fizikailag ez kétféle módon magyarázható: felteszik, hogy ezek a tagok elhanyagolhatók (ez a helyzet a Marson); horizontálisan átlagolt mennyiségeket vesznek (pl. a Földön), azaz egy-egy helyre, övre jellemző értékkel számolnak. Egyszerű, stacionárius esetben a modell a hőáramok közti egyensúlyt írja le, azaz a turbulens és a sugárzási vertikális hőcsere egyensúlyát. A konvektív áramot vagy empirikus vagy részben empirikus módszerekkel parametrizálják. A részben empirikus módszer alkalmazásánál feltesszük, hogy a hőáram döntően turbulens örvényekkel valósul meg, és a karakterisztikus horizontális méretük sokkal kisebb, mint maga a rendszer (ez a keveredési elmélet). Priestly (1959) szerint a szabad konvekció esetén a hőáram arányos a potenciális hőmérséklet gradiensével. A sugárzásáramok a magasság függvényeként fejeződnek ki. Azokban a modellekben, amelyekben a légköri komponensek vertikális profilja adott, kiszámítható a felmelegedés sebessége a magasság függvényében és szerepe a vertikális hőmérséklet eloszlásában. Parametrizálják még a felhőzetet, az albedót, a sugárzás és a felhőzet kölcsönhatását stb. A sztratoszféra vizsgálatánál Callis (1978) részletesen elemezte a különféle folyamatok leírásával kapcsolatos problémákat. A horizontálisan homogén légkör gáz- és aeroszolkomponenseinek egydimenziós fotokémiai modellje esetében csak a vertikális áramokat tekintjük. Az ilyen modellekbe bekapcsolhatók a légkör fotokémiai aktív anyagainak jelentősebb reakciói. Így lehetőség nyílik a meteorológiai paraméterek napi és szezonális változásainak vizsgálatára. A vertikális átvitel operátorát a szélesség mentén a horizontális átvitel operátorának átlagolásával kapjuk meg. Általában külön vizsgálják azokat az anyagokat, amelyeknek nincs forrása és nyelője a sztratoszférában és a troposzférából a csapadékkal kerülnek ki. A modell alsó határfeltételei lehetnek például: az anyagok koncentrációi és a vertikális áramok vagy az aktív felszínnel való kölcsönhatás. A felső határon néhány anyag számára a fotokémiai egyensúly feltételét teremthetjük meg, azok számára pedig, amelyeknek nincs forrása és nyelője, a légköri átvitel egyensúlyát. A kétdimenziós fotokémiai modellek a troposzférában és az alsó sztratoszférában zonálisan homogén mezővel számolnak, és meridionális síkban történik az alkalmazásuk. Ez főként két tény következtében tehető meg: a források nagy részének zonális kiterjedése van, a légköri zonális átvitel sebessége relatíve nagy. Az egyensúly a légmozgás átlagos zonális átvitelével, a nedves és száraz ülepedéssel, a forrásokkal és nyelőkkel áll fent. (Egyes anyagoknál és egyes területeken különböző komponensek hiányozhatnak.) Sikeres kísérletek történtek a sugárzási-konvektív és az energiaegyensúlyi modellek egyesítésére, és így két-, illetve kvázi-háromdimenziós modellezésre. A vízgőz eloszlását a troposzférában a globális hidrológiai ciklus határozza meg, de az egyszerűség kedvéért gyakran megadják.

d/ Boxmodellek. Ez a modelltípus szigorúan véve nem rendelkezik geometriai szabadsági fokkal, de lehetőség nyílik rá, hogy benne az éghajlati rendszer elemei külön-külön számításba kerüljenek. Az ilyen modellek a klímarendszer elemei közti anyagforgalomban játszanak jelentős szerepet, például a széndioxid-ciklus modellezésében. Ezekben az esetekben az egyes boxok rezervoárok. A boxok egymás közti kapcsolata alapján a következő típusokat különböztetjük meg:

- Lineáris boxmodell (a boxok száma lehet 3 vagy több), amikor a két box közti anyagcserét a blokkok tartalma egy-egy konstanson keresztül határozza meg.

- A nemlineáris boxmodell abban különbözik az előzőtől, hogy a két blokk tartalmának szorzata (esetleg különböző hatványon) is szerepel a blokkok kölcsönhatását leíró részben.

- A diffúziós boxmodell mélyóceáni blokkjában az átvitel a mélységtől független együtthatójú diffúzióval történik. A biotát mint egy késleltető láncszemet vizsgálja.

- Általánosított óceáni boxmodell, amely az óceán szerepét a széndioxid-ciklusban dinamikusan vizsgálja, és figyelembe veszi a késleltető és elnyelő funkcióját is.

e/ Háromdimenziós általános cirkulációs és csatolt modellek. Ezek a modellek a teljes hidrotermodinamikai egyenletrendszeren alapulnak, a nagyobb léptékű folyamatokat egzakt módon, a kisebb léptékűeket parametrizáltan veszik figyelembe. Az általános cirkulációs modellek a légkör olyan nemstacionárius hidrotermodinamikai egyenletrendszerére épülnek, amely kiegészül az állapotegyenletekkel, a különböző megmaradási tételekkel (például a vízgőzre), a megfelelő határfeltételekkel (hő- és nedvességegyensúlyi egyenletek az aktív felszínen). =gy képesek leírni a légkör dinamikai és termikus állapotának időbeli fejlődését. Ezen fizikai folyamatok mellett egzaktul leírnak vagy paramétereznek olyan folyamatokat, mint például a sugárzásátvitel (hosszú- és rövidhullámú), nagytérségű kondenzáció és konvekció, a felhőzet dinamikája, a talaj aktív rétegének hidrológiai rendszere, a határréteg turbulens rendszere, a mezoléptékű diffúzió, a domborzat hatása. A csatolt óceán-légkör modellnél ehhez kapcsolódik az óceánmodell, amely tartalmazza az óceánra felírt (integrált vagy többszintű) hidrotermodinamikai egyenletrendszert, a sótartalomra és a jégtakaróra felírt egyenleteket. Ha a krioszféra is leírjuk, akkor még szükséges a jég dinamikáját leíró egyenletrendszer is.

Az általános cirkulációs modellekben felhasznált egyenletek és egyszerűsítések:

- A mozgásegyenlet. Ha a teljes szférikus rendszerben felírt egyenleteket tekintjük, nagyságrendi analízis alapján eltekinthetünk a metrikus gyorsulásoktól és a Coriolis gyorsulás horizontális komponenseinek a vertikális sebességből származó összetevőjétől. További egyszerűsítések: kvázihorizontális közelítés, amely a vízszintes gyorsulások felbontásában a függőleges momentumszállításnak megfelelő összetevők elhanyagolása; geosztrófikus közelítés, amely során a Coriolis-erő a nyomási gradienssel tart egyensúlyt; euleri szélegegyenlet, ahol a Coriolis-erőt hanyagoljuk el és a nyomási gradiens az individuális gyorsulásokkal tart egyensúlyt; kváziszolenoidális közelítés, amely részben figyelembe veszi az ageosztrófikus szelet is; a vertikális mozgásegyenletre alkalmazható a kvázisztatikus közelítés, amikor a vertikális mozgásegyenlet helyett a hidrosztatikus egyenletet tekintjük.

- Megmaradási tételek. Ide elsősorban a tömeg (anyag-) megmaradását és a vízgőz megmaradását biztosító kontinuitási és vízgőzszállítási egyenlet tartozik. A kontinuitási egyenletnél, ha neutrális rétegződést tekintünk, azaz a sűrűség csak függőleges irányban változik, a mély konvekciós vagy anelasztikus közelítést kapjuk, míg ha csak a levegő összenyomhatatlanságát tételezzük fel, sűrűsége térben és időben állandó, akkor a sekély konvekciós vagy Boussinesq-közelítést nyerjük. Ha itt elhanyagoljuk a vertikális tagot, kvázi-nemdivergens közelítésről beszélünk.

- A termodinamikai egyenlet. A termodinamikai egyenlet egyszerűsíthető, ha eltekinthetünk a potenciális hőmérséklet konvekció által megvalósított vertikális szállításától és a vertikális hőmérsékleti profilt standardizáljuk. További egyszerűsítés, ha neutrális rétegződést tételezünk fel.

Az általános cirkulációs modellekben leírt vagy paraméterezett főbb fizikai folyamatok:

- Sugárzás és felhőzet. A sugárzásátvitel elméleti alapjai eléggé jól ismertek, a sugárzási áramok számítása mégis nagyon bonyolult feladat. A fő problémák, amelyek gyakorlati jellegűek, két csoportra bonthatók: a vizsgálandó sugárzási folyamatok kiválasztása és a számításhoz szükséges közelítés megállapítása (ez azért szükséges, mivel a számítás nagyon időigényes, és túlságosan lefoglalhatja a számítógépet); illetve a sugárzási blokk megfelelő bemenő adatainak a biztosítása. A sugárzási folyamatok számításakor többféle módszer áll rendelkezésre, melyeket többek között Karol (1986) részletesen tárgyal.

- Planetáris határréteg. A határréteg azért játszik fontos szerepet a modellezésben, mivel ez kapcsolja a szabad légkört az aktív felszínhez, így ezen keresztül zajlik le az energia- és nedvességszere jelentős része, de sok gáznak és aeroszolnak is jelentős nyelői és forrásai vannak itt, a légkör ezen részében zajlik az emberi tevékenység túlnyomó hányada, stb. Kétféle határrétegmodellt különböztetünk meg: interpretáló modell az, amelyik a globális modell által szolgáltatott nagytérségű eredményeket finomítja, mezoskálára transzformálja; interaktív az a modell (vagy parametrizáció), amely közvetlen kapcsolatban van a globális modellel, és azzal interaktív úton hatnak egymásra. A második típuson belül is megkülönböztetünk két csoportot: ha a határréteg legfeljebb egy modellszintet tartalmaz, az ellenállási tényezőn keresztül kell

paramétereznünk a határréteget, mint egészet; ha a határréteg több modellszintet tartalmaz, lehetőség nyílik egy többé-kevésbé megközelítő, de egzakt modellezésre.

- Nedves konvekció. A hidrológiai ciklus elemeinek tárgyalását kezdjük a nedves konvekcióval. Itt jelentősen eltérő parametrizációk ismeretesek (Manabe et al., 1965; Kuo, 1974; Arakawa és Schubert, 1974). A parametrizációk azonban mind tartalmaznak hiányosságokat és a vizsgálatok azt mutatják, hogy a melegezési folyamatok érzékenyek a különböző parametrizációkra. =gy a konvekció kutatása a jövőben is az egyik centrális probléma marad.

- A nemkonvektív eredetű csapadékok. Ez a folyamat az egyszerűbben kifejezhető közé tartozik. A hőmérséklet és a nedvességváltozás számítása után vizsgálják, és azt a vízgőzmennyiséget határozzák meg, amelynek kondenzálnia kell, (a megfelelő fázisátalakulásokkor felszabaduló energia figyelembevételével), hogy a relatív nedvesség ne haladjon meg egy bizonyos adott küszöbértéket, amely általában 80-100 % között van. Vizsgálható itt is a kiesett cseppek párolgása, amelyet egyesek a talajszint közelében elért relatív nedvesség-határtól, mások a felhők térbeli eloszlásának sűrűségétől tesznek függővé.

- A földfelszíni mennyiségek. A földfelszín hőmérsékletét általában a lokális hőegyensúlyból határozzák meg. Ebben figyelembe veszik a felszín által elnyelt napsugárzást, a felszín által kisugárzott hosszuhullámú kisugárzást (esetleg effektív kisugárzást), a felszínből a légkörbe menő latens és turbulens hőáramokat és a felszín felől a talajba menő hőáramot. Ezen utóbbit néha elhanyagolják, vagy az egyenleg valamilyen tagjával tekintik arányosnak. Interpretáló határrétegmodell esetén lehetséges, hogy a talajban több réteget tekintenek, akkor ez a hőáram egzakt módon számítható. A felszínen lezajló hidrológiai folyamatok közül a talaj nedvességtartalmát illetve a hótakaró vastagságát szokták figyelembe venni. Ehhez meg kell állapítani a csapadék fajtáját (eső,hó), a hó olvadását, a lefolyást, a beszivárgást. Az érdességi együttható változhat különböző tényezők függvényében (pl. növényzet). Az újabb modellek képesek a növényzet hatását is figyelembe venni, bár döntően a már meglevő összefüggéseket korrigálják, tekintetbe véve a növénytakaró tulajdonságait (sztomatikus ellenállás, intercepció stb.)

## Visszacsatolási mechanizmusok

A modellek vizsgálatánál említést kell tennünk azokról a kölcsönhatásokról, amelyek döntő hatással vannak az éghajlati rendszer állapotának az alakulására. E kölcsönhatások révén, a rendszer egyik elemének megváltozása egy többé vagy kevésbé bonyolult hatásláncon keresztül visszahat erre az összetevőre is - megerősítve vagy gyengítve az „eredeti” állapotváltozási folyamatot. A továbbiakban néhány fontosabb visszacsatolási mechanizmust jellemezünk, különös tekintettel a földközeli léghőmérsékletet érintő összefüggésekre.

- Albedó-hőmérséklet kapcsolat. Ha növekszik a hőmérséklet, akkor csökken az albedó (pl. hóolvadás miatt), ami további hőmérsékletemelkedéshez vezet. Ez a pozitív visszacsatolás (a kiindulási állapotot labilizáló, azaz a kezdeti hatást megnövelő, annak következményeit felerősítő mechanizmus) okozza döntően a CO<sub>2</sub> kétszereződési scénáriók során a sarkvidékek nagyobb felmelegedését a mérsékeltebb szélességekhez viszonyítva. Mindennemű emberi felszínátalakító tevékenység (erdőirtás, mezőgazdasági művelés, ipari szennyezés, városépítészet stb.) így hat közvetlenül a lokális, illetve a globális éghajlatra, az érintett terület méretétől függően. Az antropogén hatások iránya és mértéke az új és a régi felszín albedójának különbségétől függ.

- A hőmérséklet és a kisugárzott hosszuhullámú sugárzás kapcsolata. Ha növekszik a hőmérséklet, növekszik a kisugárzott energia, a lehűlés fokozódik, ez pedig a hőmérséklet csökkenéséhez vezet. Ez a mechanizmus a kezdeti állapotot stabilizálja, a rendszert érő hatást csökkenti, tehát ún. negatív visszacsatolás.

- Vízgőz-hőmérséklet kapcsolat. Ha a hőmérséklet növekszik, akkor nő a hosszuhullámú sugárzás-elnyelés is, ami további melegedéshez vezet. Ezt a pozitív visszacsatolási mechanizmust azért említendő kiemelten az üvegházhatásban résztvevő többi gáz elnyelési folyamatai közül, mivel a vízgőz a modellekben ún. belső paraméter. Másszóval, a troposzféra vízgőztartalma

döntően természetes eredetű (a sztratoszférikus vízgőz mennyisége pedig - amelynek számottevő részéről viszont feltételezik, hogy antropogén eredetű - csekély a troposzférában található vízgőz mennyiségéhez képest). Globális hőmérsékletváltozás során feltételezhető, hogy változni fog a légkör vízgőz-tartalma is.

- Felhőzet-hőmérséklet kapcsolat. Ha megváltozik a felhőzet, akkor megváltozik a sugárzási egyenleg és megváltozhat a hőmérséklet is. Amint azt a paraméterezési eljárások során ismertettük, egy roppant bonyolult folyamattal állunk szemben, így jelenleg teljes bizonyossággal nem tudjuk megállapítani, hogy ez a mechanizmus - eredőjét tekintve - pozitív vagy negatív visszacsatolás.

- A vertikális hőmérsékleti gradiens és a felszínközeli léghőmérséklet. Ha csökken a vertikális hőmérsékleti gradiens, akkor csökken a felhőzet magassága, növekszik a kisugárzott hosszuhullámú sugárzás és emiatt csökken a hőmérséklet. Hasonló gondolatmenettel belátható, hogy az ózonréteg pusztulása erősíti az üvegházhatást. (Ez a két jelenség összekapcsolódik úgy is, hogy a csökkenő sztratoszférikus ózon átenged olyan sugarakat, amelyek a széndioxid-megkötő szervezeteket pusztítják, így a széndioxid-szint növekedésének következtében az üvegházhatás is növekszik.) Ez a visszacsatolási mechanizmus szintén jelentős szerepet játszhat a közvetlen és közvetett antropogén éghajlati hatások vizsgálatánál, ugyanis a légkör hőszennyezése, összetételének megváltozása (aeroszok és gázok kibocsátásával) kihat a vertikális hőmérsékleti gradiens alakulására.

- Az üvegházhatás és széndioxid-szint kapcsolata. A növekvő üvegházhatás megnöveli a hőmérsékletet, ezáltal a hidroszféra és a bioszféra széndioxid-elnyelő képessége megváltozik (sivatagosodás, szénbeépülési folyamatok stb.), s így az üvegházhatás mértéke is megváltozik.

A felsorolt példák illusztrálják azokat a bonyolult összefüggéseket, amelyek révén az éghajlati rendszer összetevőiben lezajló természetes és mesterséges folyamatok áttevődnek más komponensekre. Az egyik említett visszacsatolás esetében, például, a sztratoszférikus ózonbomlás az ózon közvetlen hosszuhullámú elnyelő hatásán kívül a bioszférán és a vertikális hőmérsékleti gradiensen keresztül is - amely egyebek között a hidrológiai ciklust is befolyásolja - kapcsolódik az üvegházhatáshoz, míg az üvegházhatás által keltett sztratoszférikus lehűlés az ózonbontási reakciókra is hatással van. Természetesen ezek a folyamatok egyidejűleg hatnak, egy egységes rendszer keretében, s emiatt a különböző folyamatok eredői nehezen becsülhetők meg.

A modellek vizsgálatánál fontos az egyes visszacsatolási folyamatokra való érzékenységek. Ezt az egyszerűbb modellek egy részénél a priori megadják, míg a más esetekben illetve a bonyolultabb modelleknél a kapott számszerű eredmények alapján értékelik. Ebben az esetben a modell minőségének egyik jellemzője az ún. érzékenységi paraméter nagysága.

## **AZ ÉGHAJLATI MODELLEK ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI**

Amint az előző pontban említettük, a különböző paraméterezéseket úgy illesztik a modellbe egy adatbázis felhasználásával, hogy minél jobban megfeleljen a valóságnak. Az is kiderült, hogy viszonylag kevés adattal rendelkezünk, így a modellek ellenőrzése (amelyhez más adatbázist kell használni, mint az illesztéshez) eléggé nehéz. A bonyolult éghajlati modellekké elvégzendő feladatok egy része olyan, hogy egyúttal a modell verifikálása is megtörténik, s így nyerhetünk biztosítékot arra, hogy a feladatok másik osztályára, amelyet nem tudunk ellenőrizni, reális megoldást kapunk.

### **A havi átlagok numerikus előrejelzése**

Shukla (1981) kísérlete, amelyben a kezdeti adatokra véletlenszerű perturbációkat rakott (ezek a megfigyelési hibák nagyságrendjében mozogtak), bebizonyította, hogy lehetséges havi átlag dinamikus előrejelzése. Miyakoda (1983) előrejelzése során kiderült, hogy a modell nagymértékben meghatározza az eredményt. Adott esetben a legnagyobb felbontóképességű és legbonyolultabb parametrizációjú modell szolgáltatja a legjobb eredményt. Ezek az eredmények inkább elvi jelentőségűek, az operatív gyakorlatban még nem terjedtek el.

## **A kisfrekvenciás változékonyság modellezése**

A modellek és a számítógépek fejlődésével igény keletkezett nemcsak az évi menetek modellezésére, hanem az évről évre történő változások kifejezésére is. Ilyen esetekben az integrálást 6-30 évig végzik (Kutzbach et al., 1977, Manabe és Hahn, 1981), de a nagy számítógépigény miatt egyes folyamatok paraméterezéséről le kellett mondaniuk. Ezzel is magyarázható, hogy a természetes változékonyság valamivel nagyobb a modellezettnél a mérsékelt szélességeken és sokkal jelentősebb a trópusokon. Ezek az eredmények azért fontosak, mert bebizonyítják annak a lehetőségét, hogy a külső faktorok hatására az éghajlat változékonyságában bekövetkezett változásokat modellezni tudjuk.

## **Érzékenységvizsgálatok**

A modellek alkalmasak az éghajlat érzékenységének vizsgálatára. Ez azt jelenti, hogy megállapítható, hogy milyen meteorológiai mennyiség mely földrajzi eloszlásban hány százalékkal változhat, hogy annak ne legyen számottevő következménye a klímára, illetve fordítva, egy változás milyen éghajlati következményekkel járhat. Például ilyen kapcsolat figyelhető meg a talajnedvesség és a monszunok, a szárazság és az albedó, a tengeri jég területe és az általános cirkuláció (mérsékelt és szubtrópusi övezetben is) között. Ezek a kapcsolatok a parametrizációk pontosságát követelik meg. Ezek a vizsgálatok bizonyos fokig verifikálhatók az idősorokon végzett statisztikus számítások eredményeként.

## **Az éghajlati scenáriók vizsgálata**

A különböző scenáriók hatását az éghajlati rendszerre szintén háromdimenziós modellekkel vizsgálják. Ha egy modell az előző alkalmazások és a verifikációk szerint kielégítő eredményt nyújtott, akkor felhasználható különböző, nem ellenőrizhető hatásvizsgálatok elvégzésére. (A világon csak kevés modell tesz eleget ezeknek a kritériumoknak.) A leggyakrabban a széndioxid kétszereződés hatásait kutatják. Ezek az eredmények nagy szórást mutatnak, globális méretekben 1,5-4,5°C fokos hőmérsékletemelkedést.

\*

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy az éghajlatmodellezés területén sok elméleti és gyakorlati probléma megoldatlan, az ide koncentrált anyagi és szellemi erőforrások ellenére. Amíg nem tudjuk a fizikai folyamatokat megfelelően paraméterezni, addig sok eredmény modell- és parametrizációfüggő lesz. Nem sikerült eddig összeötvözni a folyamatok determinisztikus és sztochasztikus jellegét sem. Ezek dacára az eddigi eredményekre támaszkodva elmondhatjuk, hogy ha a bonyolult háromdimenziós modellek pontosan nem is írják le az éghajlatot, de egy bizonyos fokú közelítésre alkalmasak.



## 2.4. AZ ÉGHAJLAT JÖVŐJE

Az empirikus, a statisztikus és a numerikus éghajlati modellezési vizsgálatok nyomán az éghajlat változékonyságának nagyságrendjére, a jelenlegi és jövőbeli éghajlatváltozás lehetőségére és mértékére vonatkozóan számos eredmény látott napvilágot. A vizsgálatokat és eredményeiket alapvetően két csoportba sorolják: a feltételezett hatások (éghajlati kényszerek) következtében kialakuló éghajlati állapotok (másodfajú prognózis) és a jelenlegi éghajlati rendszer további fejlődésének előrejelzése (elsőfajú prognózis). Vizsgálatok nemcsak a jövőbeli meteorológiai mezők előállítására folynak, hanem rekonstruálják a múltbeli éghajlatokat is, illetve más bolygók légköri cirkulációit is modellezik. A modellezés eredményei vagy a klímarendszer tranzien্স vagy annak egyensúlyi állapotaira vonatkozhatnak. A leggyakrabban az egyensúlyi állapotot becsülik a modellek segítségével valamely külső paraméternek a jelenlegitől eltérő értéke, jellege esetén. Elvi problémát jelent, hogy a kiindulási állapot sokszor irreális, mivel nem tudjuk, hogy ha valójában bekövetkezik a kiválasztott paraméter (peremfeltétel) feltételezett változása, az a többi változó milyen mértékű megváltozásával jár együtt. A tranzien্স állapotok meghatározásának egyrészt a fizikai, matematikai és számítástechnikai követelményei nagyobbak, másrészt az így kapott becslések jelentősen eltérhetnek az egyensúlyi állapot jellemzőitől. Ezzel kapcsolatban említésreméltó, hogy az eddigi paleoklimatikus adatok alapján egy-egy hosszabb kváziegyensúlyi állapotból egy másikba való átmenet viszonylag gyorsan zajlik le. A másodfajú prognózisok keretében elsősorban a következő feltételezések következményeit vizsgálták: a napállandó változása, egy nukleáris háború következményei, vulkánkitörések, kontinensvándorlás, CO<sub>2</sub>-koncentráció változása, egyéb légköri nyomgázok koncentrációjának viselkedése, az aeroszolk mennyiségének és összetételének változása, a felszín jellemzőinek (pl. albedó, növényzet) módosulása, a krioszféra és vele kapcsolatban a tengervízszint változásai, antropogén hőszennyezés hatása, stb.

A jelenleg leginkább vizsgált kérdés az, hogy az éghajlat természetes változékonysága, illetve hosszabbtávú változása mellett folyamatban van-e egy antropogén eredetű klímaváltozás. A megfigyelések és a statisztikai vizsgálatok szerint az ipari forradalom óta mintegy 0,4-0,5°C fokos globális hőmérséklet-emelkedés következett be, amit egyes tudósok döntően a CO<sub>2</sub>-szint jelentős, mintegy 20-25%-os növekedésével magyaráznak. A numerikus éghajlati modellek alátámasztják az eddigi kutatási eredményeket, és mind a múltbeli, mind egy elképzelt jövőbeli klímakép megalkotásában segítenek.

A vulkánkitörésekre vonatkozó scénáriók során a leghosszabb tartózkodási idejű, a sztratoszférába felkerült anyagok hatását vizsgálják elsősorban. Ezek közül legfontosabb a sztratoszférikus aeroszol. Itt a legnagyobb pontatlanságot az aeroszol jellemzői viszik be a modellbe, mivel ezek jelentős határok között ingadozhatnak és nem kellően ismertek. Vulkánkitöréskor problémát okoz nemcsak a kilövellt anyagok mennyiségének és összetételének becslése, hanem azok térbeli eloszlása is. Egyes vizsgálatok szerint például 1.72 mg/cm sztratoszférikus aeroszoltartalom mellett a globális hőmérsékletcsökkenés 1 °C, de az északi félgömbön, ezen belül az 50-60 szélességi körök között +2 °C, 70-80 között -6 °C, a pólusnál +4.7 °C a változás.

A nukleáris háború légköri következményeivel kapcsolatos scénárióhoz is többféle input létezik, a kiváltó okok területi eloszlása, a légkörbe kerülő aeroszolk mennyisége és jellemzői szerint. A globális atomcsapás bekövetkezte után néhány hónappal mintegy 5-25 °C-os hőmérsékletcsökkenés következne be, a hidrológiai ciklus pedig teljesen felborulna a vertikális profilok alapvető megváltozása miatt.

A tapasztalati tények az üvegház-gázok koncentráció-növekedéséről a klímamodellek mennyiségi becsléseit felhasználva is sokféleképpen kombinálhatók az éghajlat jövőbeni alakulásának előrejelzésekor. A fő bizonytalansági tényezők ebben az esetben az üvegházgázok kibocsátásának üteme és a tényleges éghajlati rendszer válasza az időben változó külső kényszerekre. Az ilyen előrejelzések legtöbbször széles bizonytalansági sávot adnak eredményül - például a Föld átlaghőmérsékletére. Ezért az egyetlen, igen bizonytalan prognózis helyett általában különböző alternatív scénáriókat foglalmazznak

meg, legtöbbször egy maximális, egy minimális és egy valamilyen elv szerinti köztes változat formájában.

Az üvegház-gázok (mindenekelőtt a széndioxid) koncentrációjának növekedési ütemének megfelelően a Villachban és Bellagioban 1987-ben tartott konferenciák három különböző esetet vizsgálnak. A scenáriók szerint a hőmérséklet növekedés üteme rendre  $0,8^{\circ}\text{C}/10$  év,  $0,3^{\circ}\text{C}/10$  év, illetve  $0,06^{\circ}\text{C}/10$  év. A szakértői konferenciák szerint 90% annak a valószínűsége, hogy a tényleges melegedés a két szélső ütem között alakul, s 50% annak, hogy a középső változat alatt marad. Az első „magas” kibocsátású változat a fosszilis illetve a megújítható energiaformák költségeinek kedvezőtlen aránya miatt gyors, az ipari forradalom előttihez képest már 2035 körül megduplázódó, 2075-re már 820 ppm-es  $\text{CO}_2$ -koncentrációval, fokozódó erdőirtással, a halogénezett szénhidrogénekre vonatkozó egyezmények be nem tartásával és  $2,3\%$ /éves metán koncentráció- növekedéssel számol. E becslésnél figyelembe vették az éghajlat nagy egyensúlyi érzékenységét és a viszonylag rövid óceáni késleltetést. A harmadik, minimális változat szerint a  $\text{CO}_2$  koncentráció 2075-ben is csak 420 ppm lenne. Emellett ez az „optimális” változat feltételezi a halogénezett szénhidrogének kibocsátásának sikeres visszaszorítását és a metán-koncentráció növekedésének  $0,4\%$  alá csökkenését, ugyancsak kedvező éghajlat-érzékenység és késleltetés mellett. A középső változat a jelenlegi trendeket extrapolálja, de a Montreáli Jegyzőkönyvben szereplő korlátozás betartását is feltételezi. E három globális forgatókönyvhöz kiszámították a tengerszint várható alakulását is. Eszerint a magas melegedési ütemhez  $24$  cm/évtized ( $50$  év elteltével  $120$  cm), a középsőhöz  $5,5$  cm/évtized ( $27,5$  cm) tengerszint emelkedés tartozik. Az alacsony változat  $-1$  cm/évtized tengerszint-süllyedéssel járna a hőtágulás illetve a jéghátságok és az óceánok közötti víz-mérleg eredőjeként. Amit a globális átlag prognózisánál is hangsúlyoztunk, az fokozottan igaz a regionális részletek vonatkozásában. A különböző feltételezésekkel és eltérő módszerekkel származtatott jövőbeni tendenciák tudományos bizonytalansága igen nagy, ezért azok legfeljebb tájékoztató jellegű előzetes becsléseknek tekinthetők. Az említett konferenciákon a feltételezett regionális sajátosságokat is összefoglalták az egyes globális klíma-scenáriókhoz. A két első scenárió szerinti melegedés esetén a nyári hónapokban fokozatosan visszahúzódna az Északi félgömb tengeri jégtakarója. A nyugat-antarktiszi jégpajzs olvadása és leválása a tengerszint alatti talpazatról megkezdődhet, de szerencsére az  $5-7$  m-es további szintemelkedéssel járó teljes elolvadáshoz még további  $2$  évszázad lenne szükséges. Egyenletes melegedés esetén is módosulna az általános légkörzés. Pár százalékkal csökken az Egyenlítő-Pólus hőmérsékleti kontraszt és ezzel dinamikai összefüggésben a mérsékelt övi cirkuláció intenzitása. Ennek következtében erősödik az Egyenlítő és a térítő körök közötti ún. Hadley-cella vagy más néven a passzát-szélrendszer. Általában csökken az óceánok és a kontinensek közötti hőmérsékleti eltérés és mindezzel összefüggésben a mérsékeltövi ciklonok erőssége. Kis mértékben északabbra tolódik a termikus egyenlítő (vagyis a legmagasabb évi középhőmérsékletű zóna), mivel a Déli félgömb az Antarktisz jégtömbje és az óceánok túlnyomó aránya miatt lassabban reagál. Ez további járulék az Északi félteke éghajlati öveinek a Pólus felé húzódásához. Az ökológiai övek ezt az egy Celsius fokonként kb.  $100-200$  km-re becsülhető eltolódást a biológiai alkalmazkodáshoz szükséges további időkéssel követik majd. A legnagyobb hőmérséklet-emelkedés az Északi félgömb magas szélességeinek telén lennének várhatók, ahol a melegedés  $2-2,5$ -szeresen haladja meg a globális változás mértékét. A csapadék ugyanitt a téli félévben és az egyébként is csapadékos egyenlítői és monszun-térségekben tovább nő, ugyanakkor a közepes szélességek kontinensein a nyári időszakban illetve a száraz szubtrópusi vidékeken tovább csökken. Földi átlagban az eredő tendencia valószínűleg a csapadék növekedése, vagyis a hidrológiai ciklus felgyorsulása lesz. A magas szélességeken a melegedést a felhőzet növekedése, a talajfagy lassú felengedése, a tundra és a boreális erdők közötti választóvonal északabbra tolódása kíséri. A mérsékelt szélességeken a légköri cirkuláció övezeteinek és nagytérségű képződményeinek (állandó helyzetű illetve újra meg újra ugyanott keletkező anticiklonok és ciklonok) áthelyeződése miatt a változások előjelének több kombinációja lehetséges az egyes kisebb - országnyi - térségekben. A hőmérséklet emelkedése ugyanakkor legtöbb térség és évszak közös vonása. A száraz szubtrópusi vidékeken a csapadék további várható csökkenése és a melegedés miatt intenzívebb párolgás és vízigény még kritikusabb

teheti e térségek életfeltételeit. A nedves trópusi térségekben ugyanakkor a csapadék további növekedése várható.

### **3. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS VÁLTOZÁSÁNAK GLOBÁLIS ÉS REGIONÁLIS HATÁSAI**

#### **3.1. A HATÁSOK ÁLTALÁNOS ÁTTEKINTÉSE ÉS A HATÁSOK VIZSGÁLATÁNAK MÓDSZERTANI KÉRDÉSEI**

A Föld éghajlata a múltban széles időbeli skálájú változásokat mutatott. Feltételezhető, hogy ez a jövőben is így lesz. Annál is inkább, mert az éghajlatváltozást, változékonyságot előidéző természetes okok mellett az antropogén tényezők is egyre nagyobb szerepet játszanak. Az ember egyre növekvő mértékben avatkozik be a természet rendjébe és így az éghajlatba. Ebből a szempontból is figyelemfelkeltők a szélsőséges időjárási, éghajlati jelenségek (tartósan magas illetve alacsony hőmérsékletek, aszályok, özönvízszerű esőzések stb.). Ezek lehetnek egy éghajlati állapot ingadozásai, de lehetnek egy éghajlatváltozás első jelei is. A jelenlegi éghajlati adatok nem teszik lehetővé az antropogén eredetű okok pl. a széndioxid tartalom növekedése következtében fellépő éghajlatváltozás (jel) és a természetes változékonyság (zaj) egyértelmű különválasztását. Ennek ellenére nem lehet arra várni, amíg a természet határozottabb bizonyítékokat szolgáltat, hanem célszerű előre felmérni az éghajlatváltozás lehetséges hatásait és fel kell készülni arra, hogy az esetleges káros hatásokat megelőzzük, csökkentjük vagy alkalmazkodjunk azokhoz. E lehetséges hatások jó része - feltehetően - hasonló az éghajlingadozások már ismert következményeihez: az esetleges éghajlatváltozás közvetlen ökológiai, társadalmi-gazdasági hatásai és a társadalom „válaszai” tehát tanulmányozhatók a múltbeli tartósabb éghajlingadozások, éghajlati anomáliák elemzésével. E hatások tehát nem előzmények nélküliek, ugyanakkor azok és a társadalom „válaszai” nagymértékben függnak a társadalom fejlettségi szintjétől, szervezeti, technikai eszköztáráról. A környezet, az éghajlat állapotához való hatékonyabb alkalmazkodásnak pedig akkor is nagy a jelentősége, ha a - legalábbis tendenciájában - egyirányú állapotváltozás hipotézise nem vagy hosszú ideig nem kellő egyértelműséggel igazolható.

Az éghajlati változékonyság és változás hatásainak tanulmányozása emiatt szorosan összefügg. Az éghajlati változékonyság és a változások hatásai mind a természeti, mind a társadalmi-gazdasági folyamatokban bonyolult, egymáshoz hierarchikusan csatlakozó, ugyanakkor a hatások folyamatát sokféle visszacsatolással is szabályozó láncolaton keresztül terjednek tovább. A hatásokat részben tényleges (fizikai, biológiai stb.) kapcsolatok továbbítják, mint például az éghajlat-lefolyás vagy az éghajlat-terméshozam relációkban. Más esetekben a hatások csupán a társadalom-gazdaság tágra értelmezhető viselkedésének megváltozását váltják ki tényleges kapcsolatok megléte nélkül.

A hatások továbbításának e két formáját az éghajlati hatásvizsgálatok módszertani ajánlásai eléggé egyértelműen elkülönítik (Kates et al., 1985). A szétválasztást az is indokolja, hogy amíg az éghajlat biofizikai hatásainak vizsgálatára alkalmazható eljárások, módszerek, maguknak a hatásvizsgálatoknak az eredményei jól általánosíthatók, sokkal óvatosabban tehető ez meg a társadalom-gazdaság reakcióját illetően, hiszen - mint fentebb említettük - ez utóbbi nyilvánvalóan nem választható el a társadalom és a gazdaság fejlettségétől, berendezésétől, kultúrájától (Glantz et al., 1988). Az éghajlati változások a társadalom-gazdaság területén többnyire az éghajlat valamilyen közvetlen biofizikai hatásán keresztül érvényesülnek.

Annak ellenére, hogy az emberiség jelentős technológiai fejlődést ért el, gazdasági és társadalmi tevékenységet jelentősen befolyásolja az éghajlat. Az élelmiszertermelés például alapvetően éghajlatfüggő. Ez a függőség még csak fokozódik azáltal, hogy a világ népessége egyre növekszik, s ezért nő az élelmiszerigény, nagyobb terméshozamokra van szükség, valamint további a termelés számára kevésbé optimális területeket kell művelés alá venni. De nemcsak az élelmiszertermelés demonstrálja az ember és az éghajlat kapcsolatát, hanem más területek is. A különböző hatásvizsgálatok tapasztalatai alapján, de heurisztikusan is arra lehet következtetni, hogy az éghajlati változások következményei legérezhetőbben és legközvetlenebbül a mezőgazdaság, a vízgazdálkodás, a tengeri halászat, az energiagazdálkodás és az egészségügy egyes területein jelentkezhetnek (Kates et al., 1985).

Az éghajlatváltozás hatásának becsléséhez alapvető feltételezésekre van szükség, amelyek a jövő népességére, gazdasági és technológiai trendjére vonatkoznak. Mivel ezeket sem lehet egzakt módon előrejelezni, plauzibilis scenáriók egész sora állítható elő. A különféle scenáriók összehangolása szükségessé teszi a természet- és az érintett társadalomtudományok szakértőinek együttműködését. Interdiszciplináris feladatról van tehát szó, amely számos tudományág képviselőinek, gazdasági szakembereknek a kutatásokba történő bevonását igényli. E szempontok nemcsak az éghajlati hatásokra, hanem hasonlóképpen érvényesek általánosabban is, a természeti környezet globális változásának és e változás következményeinek tanulmányozására is.

A meteorológusok feladata egyrészt az éghajlat változékonyságának vizsgálata, az éghajlat változására vonatkozó scenáriók megalkotása, másrészt az érintett területek szakértőivel együttműködve a társadalmi-gazdasági tevékenység különböző szféráira azoknak az összefüggéseknek, „hatás-scenárióknak” a szintézise, amelyekkel a társadalomnak az éghajlat iránti érzékenysége, „tűrőképessége” vizsgálható. A végső cél az, hogy a vizsgálatok alapján olyan ajánlások, javaslatok szülessenek, amelyek a politikai döntéshozók, gazdasági-pénzügyi szakemberek részére döntést-elősegítő információkat nyújtanak.

Az éghajlatváltozás társadalmi-gazdasági hatásainak felmérésére irányuló hatásvizsgálatok kiinduló pontja az éghajlatváltozási scenárió. Ez úgy definiálható, mint a hőmérséklet, a csapadék és más fontos meteorológiai elemek térbeli mintájának és évszakos viselkedésének leírása egy megváltozott éghajlati állapotban. A scenárió tehát egy jövőbeli klímaállapot fizikai természetére vonatkozó fikció, nem pedig valóságos prognózis, amely várhatóan be fog következni. Az ilyen feltételes becsléseket „másodfajú prognózisoknak” is nevezik.

Az éghajlati hatásvizsgálatokban módszerüket tekintve lényegében kétféle közelítést alkalmaznak: a vizsgált terület, tevékenység jellemzői és az éghajlati elemek közötti összefüggéseket statisztikus vagy dinamikus (esetleg koncepcionális) modellel leírják, majd a modell segítségével az új - becsült vagy feltételezett - éghajlati adatoknak megfelelően előállítják - modellezik - a vizsgált terület jellemzőinek új értékeit; az analógiás módszer szerint a múltbeli észlelések alapján megkeresik azokat a viszonylag hosszabb, összefüggő - ritkábban „csonkolt” - időszakokat, amelyeknek főbb éghajlati jellemzői hasonlóak a feltételezett vagy modellezett éghajlati jellemzőkre, s az így kiválasztott időszak egyéb (pl. regionális) éghajlati paramétereit tekintik az éghajlatváltozásokat követő új egyensúlyi állapotban a megfelelő paraméterek becsléseinek.

A hatáselemzési modellek többek között az olyan nagytérségű, háromdimenziós numerikus modellekre (általános cirkulációs modellekre, „GCM”-ekre) épül(het)nek, amelyekkel becsülhető az éghajlati elemeknek illetve azok tér- és időbeli eloszlásának a külső vagy belső kényszerek hatására bekövetkező változásai, azaz az éghajlatnak a különböző hatásokkal szembeni érzékenysége is. A jelenleg alkalmazott GCM-k számos egyszerűsítést tartalmaznak; közülük hatás-scenáriók készítésre lényegében csak azok használhatók, amelyek az évszakos változást és a reális topográfiát figyelembe veszik. Ilyen például a Brit Meteorológiai Szolgálat (BMO), vagy a New York-i Goddard Intézet (GISS) modellje (Santer, 1985). Az általános cirkulációs modellek révén nyert eredmények nagy térségre jellemző adatokat szolgáltatnak. Kisebb területekre (pl. Európa egyes régiói, országok) történő felhasználásuk esetén az adatok reprezentativitása erősen csökken. Ezen kétféle módon lehet segíteni. Vagy növelni kell a modell felbontó képességét, vagy statisztikai módszerek bevonásával lehet az adatokat regionális, lokális méretekre „transzformálni”.

Az éghajlati scenárió-készítés másik típusa az analógia elvét használja fel. Az analógiás módszer azon a feltételezésen alapul, hogy az óceán és a krioszféra által képviselt ugyanazon határfeltételek esetén az általános légköri cirkuláció hasonlóan válaszol a különböző kényszerekre. Azaz pl. valamennyi (globálisan) meleg éghajlati periódust ugyanazok a felszínközeli meteorológiai karakterisztikák jellemzik, még akkor is, ha a melegebb éghajlatot előidéző okok különbözőek. Tehát a melegedés tényét nem befolyásolja az, hogy a kényszer a légköri széndioxid tartalom növekedése volt-e, vagy a besugárzás mennyiségében állt be változás. Az analógián alapuló eljárásokon belül két módszert szokás alkalmazni a jövőbeli éghajlati állapot megadására. Az egyik paleoklimatológiai adatok (évgyűrűk, jégkristályok, pollen-analízis, archeológiai adatok stb.) felhasználásával indirekt információt nyújt az éghajlati mérések megkezdése előtti időszak jellemzésére (Kellogg, 1977). A másik módszer alapja az, hogy a műszeres észlelések megkezdése

után, a rendelkezésre álló hosszú éghajlati adatsorokból kiválasztanak olyan periódusokat, amikor szélsőségesen hideg vagy meleg időszakok voltak. Ezeket az extrém történeti szituációkat analógiáknak tekintve különböző jövőbeli éghajlati állapotok, scenáriók vázolhatók fel (Lough et al., 1983; Paulitkof et al., 1984). Az utóbbi eljárás alkalmazásakor több különböző mód lehetséges arra vonatkozóan, hogy a rendelkezésre álló mérési sorozatokból mely éveket vagy periódusokat használják scenáriók előállítására. Elterjedt az a mód, hogy pl. szélsőségesen meleg múltbeli időszakokat választanak ki, majd összevetik azok jellemzőit a sokéves éghajlati középértékkel vagy kontrasztként egy hideg periódus vagy évszak jellemzőivel. Ezzel szemben az egyedi évek vagy az évek csoportjának kiragadása általában több hátrányos tulajdonsággal rendelkezik, ami abból fakad, hogy pl. a megnövekedett légköri széndioxid-tartalom által előidézett éghajlati hatások érvényesülése - többek között az óceánok vagy a krioszféra szerepe miatt - egy meglehetősen lassú folyamat, s ezt az átmenetet az egyedi évek nem vagy nem megfelelőképpen reprezentálhatják. Ha egymást követő évek csoportját használják, akkor a belőlük származtatott scenáriók valószínűleg realisabbak lesznek, mert a tekintetbe vett időszak alatt megkezdődik és folyamatban van a légkör és a megváltozott határfeltételek közötti egyensúly helyreállása. Ezért minél hosszabb időszakot választanak, annál realisabbnak tekinthető az így nyert scenárió. (Másszóval itt a „tranzienst” és az egyensúlyi klímaállapotok megkülönböztetéséről van szó.) Természetesen ennek a megoldásnak a műszeres észlelések hossza korlátot szab. (Ésszerű kompromisszumként például 20 éves időszakokat választanak.) Az egymást követő évek adatai alapján képzett scenáriók a hatástanulmányokra céljára jól alkalmazhatók és a meteorológiai elemek természetes változékonyságának összehasonlításával a társadalmi-gazdasági folyamatokra gyakorolt hatások is becsülhetők. Ehhez természetesen figyelembe kell venni azt is, hogy az éghajlati hatások mellett más - például technológiai - tényezők is befolyásolják az említett tevékenységeket, azok eredményeit.

Az analógiával szerkesztett scenáriók által nyújtott éghajlati adatok lehetőséget nyújtanak a megváltozott éghajlati kép hatásainak becslésére a statisztikus empirikus összefüggések felhasználásával. A hatásmodellek - legyen szó akár a növénytermesztésről, ipari, energiagazdálkodási, vízügyi tevékenységről - a leggyakrabban a regressziós modellekre épülnek: ezek segítségével becsülik az éghajlati jellemzők és a vizsgált tevékenység paraméterei közötti számszerű kapcsolatokat. A hatásvizsgálatokat tovább bonyolítja az a tény, hogy általános hatásmodell nem készíthető még azonos jellegű hatások vizsgálatára sem, hanem - például az éghajlat-növény modellek esetében - azt minden egyes növényfajtára egyedileg kell elvégezni. Az említett statisztikai modellek egyszerűségéből fakad a legnagyobb hátrányuk is: e modellek a vizsgált összefüggések reális fizikai alapját nem írják le, a hatásmechanizmust, a folyamatokat „fekete dobozként” kezelik. Másrészt jelentékeny hibák forrása lehet, hogy számos esetben nem teljesülnek az ilyen modellek alkalmazásához szükséges, a „prediktor”-változók függetlenségére és linearitására vonatkozó feltételek (Katz, 1979). Emellett a regressziós technika általában alábecsüli a terméshozam eltérését a várható értéktől szélsőséges meteorológiai helyzetekben. Így e módszer csak nagy térségekre, az átlagos következmények - pl. terméshozamok, energiafogyasztási igények - „előrejelzésére” alkalmazható.

A mezőgazdasági hatásvizsgálatoknál alkalmazott dinamikus (statisztikus-dinamikus) modellek a fenti hátrányoktól mentesek. Ezek a modellek a növény és a környezet kölcsönhatását jelentő fizikai, biológiai folyamatokon alapulnak, valamint tartalmazzak talajfizikai, növény-fiziológiai és mikrometeorológiai feltételeket, összefüggéseket is. Ezek a modellek szimulálják a növény tényleges fejlődését és sokoldalúságuk révén elvben lehetővé teszik meglehetősen pontos hatásvizsgálati, érzékenységi becslések előállítását. Ehhez azonban olyan részletes agroklimatológiai adatokat, paramétereket igényelnek, amelyek nagy területre és hosszú időtartamra általában nem állnak rendelkezésre.

Az eddig vázolt „másodfajú prognózisok” mellett az éghajlati hatásvizsgálatoknál felhasználhatók az ún. eset-scenáriók is. Ellentétben a fenti scenáriókkal, ezek nem fikciók, hanem a múltban ténylegesen bekövetkezett események, amelyek analízisa - szintén az analógia elvét feltételezve - lehetőséget ad annak becslésére, hogy az éghajlati elemeknek egy jövőbeli változására a társadalom hogyan válaszol (Glantz, 1988). E célra azonban a jelentősebb éghajlatfluktuációknak (anomáliáknak)

olyan a közelmúltban lezajlott eseteit vizsgálják, amelyek társadalmi-gazdasági háttére még reálisan egybevethető a (közel-)jövőbeli feltételezhető változékonyság vagy változás társadalmi feltételeivel. Az eset-szenáriók segítségével vizsgálható a társadalom jelenlegi felkészültsége az éghajlatváltozásra illetve a szélsőséges meteorológiai helyzetekre, azok hatásaira.

Összefoglalva az éghajlati hatásvizsgálatok módszereiről elmondottakat, általánosságban a következő megállapításokat tehetjük. Az analógiás eljárás hátránya, hogy voltaképpen az éghajlati realizációk csak viszonylag kis száma között válogathat, s ebből adódóan többnyire a modellezett éghajlati egyensúlyi állapot csak viszonylag kevés számú mutatója (jellemzője) alapján keresheti az analógiát. Elsősorban tehát akkor alkalmazható, ha az analógia kiválasztása kevés jellemző alapján megtörténhet, így pl. elegendőnek fogadjuk el, hogy a kiválasztott időszak sokévi átlagos évi csapadéka és/vagy középhőmérséklete legyen azonos egy előre előrejelzett vagy feltételezett értékkel. A modellező eljárás használatánál ez utóbbi probléma elkerülhető, hiszen a jól szerkesztett modellek az éghajlat bármilyen felvett realizációjára megadják a keresett választ, s ilyen esetekben a korlátot „csak” a modellbe beépített éghajlati változók megfelelő megválasztása jelenti. A rövid idejű (havi, napi, sőt órás léptékű) koncepcionális modellek bemenő változóit jelentő éghajlati adatok nagyszámú és tetszőleges változtatásával olyan légköri állapotokat is szimulálni lehet, amelyek a légkör ténylegesen megfigyelt változásai között nem is fordultak elő. Ugyanakkor a modellező eljárások hátránya a modellkapcsolatok stabilitásának bizonytalansága. Ez a bizonytalanság az egyszerűbb felépítésű regressziós kapcsolatok esetében könnyen szembetűnő, már csak azért is, mivel a modellezett éghajlat definíció szerint kívül esik a modell kalibrálásánál felhasznált éghajlati jellemzők tartományán. Ez a bizonytalanság a sok paramétert használó modellek esetében nem ilyen nyilvánvaló, s ebből adódóan gyakran tévesen feltételezik, ez a probléma a numerikus vagy koncepcionális modelleknél nem is létezik.

Az utóbbi években a klímaváltozással foglalkozó összefoglaló tanulmányok, vizsgálatok többségéhez szervesen kapcsolódnak az ennek következményeit (hatásait) is áttekintő elemzések (pl. DOE, 1987, Villach-Bellagio, 1987, Toronto, 1988). Ezek természetesen feltételezik a változások regionális sajátosságainak - legalábbis feltételes forgatókönyvek (szcenáriók) formájában való - ismeretét. A hatáselemzésekben érintett ágazatok, területek szakértőinek együttműködésében, e munkák koordinálásában a WMO, a UNEP és a Nemzetközi Alkalmazott Rendszerelemzési Intézet (IIASA) kulcsszerepet játszik (Chen and Parry, 1987, Parry et al., 1988).

A közelmúltban Magyarországon is megkezdődtek az éghajlatváltozás lehetséges hatásait feltérképező vizsgálatok az éghajlati elemek változására érzékeny gazdasági területeken. Ezek az első próbálkozások téma- és helyzetfeltáró jellegűek. A továbbiakban részletesen bemutatjuk a legfontosabb hatásterületeken az éghajlat változékonyságával és esetleges változásával összefüggő következmények vizsgálatának sajátos módszereit, az eddigi kutatások lényegesebb eredményeit.

A vízjárás-vízgazdálkodás vonatkozásában alapvető annak a feltárása, hogy a hidrológiai paraméterek változása kapcsolatba hozható-e az éghajlati jellemzők értékeiben bekövetkező változásokkal. A külföldi vizsgálatok eredményeinek összefoglalása után, áttekintjük az eddigi hazai kutatások eredményeit és javaslatokat teszünk a további feladatokra.

A mezőgazdaság esetében a kapcsolat nyilvánvalóbb, de annál nehezebb a változás kvantitatív leírása, hiszen egyrészt a növényfajták érzékenysége, tűrőképessége széles határok között változhat, másrészt általános hatásvizsgálatok helyett a legfontosabb növényfajták esetére egyedi elemzéseket kellene végrehajtani. Jelen tanulmányban a hatások becsléséről csak általánosságban szólunk, a hazai részletesebb vizsgálatok, hatáselemzések végrehajtása a jövő fontos feladata.

Az éghajlatváltozásnak az erdőkre és az erdőgazdálkodásra gyakorolt hatását tárgyaló részben múltbeli példák alapján elemezzük a klímahatást, ismertetjük a természetes erdőtársulások elhelyezkedését, azok klímátípustól való függését. Érintjük a fafajmegválasztás néhány kérdését, valamint szólunk a szénkörforgalom és az erdő kapcsolatáról.

Az energia és klíma viszonya kétoldalú kapcsolatrendszer, amelyben vizsgálandó az energiaszolgáltatás érzékenysége az időjárás és az éghajlat változásaira, másrészt az energiatermelés- és fogyasztás levegőkörnyezet- és éghajlatmódosító hatása. Áttekintjük e kapcsolat főbb összetevőit, illetve utalunk az ezzel kapcsolatos külföldi és hazai kutatásokra, a javasolt energiastratégiákra. Külön

rész foglalkozik a hazai, környezetvédelmi szempontokat figyelembe vevő középtávú energiapolitikával.

A hatásvizsgálatok befejező részeként az éghajlat-változékonyság- és változás társadalmi-gazdasági vonatkozásaival, általános koncepcionális és módszertani kérdésével foglalkozunk.

### 3.2. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS FELTÉTELEZETT VÁLTOZÁSÁNAK HATÁSA A VÍZJÁRÁSRA ÉS A VÍZGAZDÁLKODÁSRA

Az éghajlat változékonyságának és esetleges változásának a hatása legközvetlenebbül a vízjárás, a természetes vízellátottság módosulásában jelentkezik. Számos más területen a hatások - közvetve - a vízjárással illetve a vízgazdálkodással kapcsolatos változásokon keresztül érvényesülnek. Olyan területekről és emberi tevékenységekről van szó, ahol: a víz anyagi minőségében hasznosul (lakossági, mezőgazdasági vízfogyasztás, egyes ipari-technológiai folyamatok); a víz mint természeti erőforrás jelenik meg (víziközelkedés, vízerőtermelés, biológiai erőforrás a halászatban); a víz veszélyforrást (emberi tevékenységet korlátozó tényezőt) jelent; a víz a természetes környezet, a táj része.

A természetes vizek járása - a vízfajtotól is függő mértékben - jól követi az időjárási állapotok változásait, az éghajlat rövidebb idejű ingadozásait. Ennek megfelelően, egy-egy adott térségben időszakos vízbősséggel vagy -hiánnyal kell számolni. A tapasztalatok szerint a társadalom a vízjárás rövidebb idejű ingadozásaihoz számos esetben nem csupán alkalmazkodott, de az abból származó előnyöket is hasznosította. Az alkalmazkodásnak azonban erős korlátai vannak. Történelmi tapasztalatok szerint, különösen az éghajlat - s emiatt a vízjárás - hosszú idejű ingadozásához (anomáliájához) való alkalmazkodás hiánya vagy korlátai akár egykori kultúrák megsemmisülését is elősegíthették. A kellő technológiai háttérrel nem rendelkező társadalmakat ma is jelentős próbatétel elé állítják az éghajlat akár csupán rövidebb idejű ingadozásai nyomán fellépő, vízbősséggel (árvizek) vagy vízhiánnyal (aszály) jellemezhető időszakok.

Az alkalmazkodástól eltérően a szabályozás a társadalom érdemi beavatkozását jelenti a részben az éghajlati ingadozásoktól függő természeti folyamatokba. A vízjárás szabályozása a természetes vízjárás részleges vagy teljes időbeli és/vagy térbeli megváltozását eredményezi. (Meg kell említeni, hogy a természetes vízjárást nemcsak a szabályozási célú direkt beavatkozások, de a vízgyűjtőn különböző céllal végrehajtott emberi beavatkozások közvetve is módosítani képesek.)

A vízháztartásnak végsősoron az éghajlat rövidebb idejű ingadozásaihoz kötődő szabályozása terén, a szabályozás tudományos alapjait és a szabályozás műszaki formáit tekintve a társadalom gazdag tapasztalatot gyűjtött, mégis alapvető dilemmaként jelentkezik, hogy ezek a múltbeli tapasztalatok vajon elegendőeknek bizonyulnak-e a maitól jelentősebben eltérő éghajlati viszonyok mellett.

Ahogy a vízjárás, a vízfajtotól is függően, az éghajlat különböző időléptékű ingadozásaira érzékeny, úgy a vízgazdálkodási tevékenységek is eltérő módon érzékenyek az éghajlat különböző időléptékű ingadozására. Cohen (1982) a vízgazdálkodási tevékenységek éghajlati érzékenységét az éghajlati ingadozások idő-skálája szerint különbözteti meg: az árvízvédelem, az erózió elleni védelem, a talaj-nedvességszabályozás az éghajlat rövidebb idejű ingadozásaira érzékeny, a lecsapolás, tározás, a vízátervezetések, a talajvizekre épülő vízellátás az éghajlat hosszabb idejű ingadozásaira. Szesztay (1982) a hazai vízgazdálkodási tevékenységeket az éghajlati hatások iránti érzékenységük szerint osztályozta a következőképpen:

#### A jellemző éghajlati hatások típusai

Vízgazdálkodási tevékenységek	Éven belüli időjárási szélsőségek	Többéves tartósságú időjárási sajátosságok	Évszázados vagy több évszázados irányzatok
Ár-, belvízmentesítés	+	+	
Folyószabályozás, mederrendezés	+	+	



Lecsapolás, talajvízszint szabályozás	+	+	+
Erózióvédelem	+	+	
Csatornázás, szennyvíztisztítás	+	+	
Vízellátás		+	+
Folyócsatornázás	+	+	
Tározás		+	+
Vízátvezetés		+	+

Callaway és Currie (1985) a vízgazdálkodási tevékenységeket a széndioxid légköri növekedésének következtében várható éghajlati változásokkal szembeni érzékenységek szerint csoportosítja, megkülönböztetve a különösen, mérsékelten és kismértékben érzékeny vízgazdálkodási tevékenységeket. A különösen érzékeny vízgazdálkodási tevékenységek közé sorolják a felszíni és talajvizekre telepített vízellátást, az árvízvédelmet, az aszályok elhárítását, a folyók hordalékosságával és a vizek sótartalmával kapcsolatos problémákat, valamint a vízigények rangsorolásából adódó konfliktusokat. Mérsékelten érzékeny - egyebek mellett - a talajnedvesség-szabályozás, a felszíni vizek elszennyeződése, a tavak savasodása és eutrofizálódása, a hajózás, míg kismértékben érzékeny a tározó feliszapolódása, a felszín alatti vizek elszennyeződése, a medererózió.

A vízgazdálkodás feladatai a vízjáráson keresztül kapcsolódnak az éghajlathoz. A folyók, a tavak, a felszín alatti vizek - általában a hidrológiai rendszer - állapota a légköri állapotváltozásához (az időjáráshoz) hasonlóan és azzal összefüggésben állandóan változik. A legfontosabb állapotjellemzők: a vízállás (vízszint), a vízhozam, a jégviszonyok, a hordalékosság, egyes vízminőségi paraméterek rendszeres észlelésével a hidrológiai rendszer állapotváltozásai több-kevesebb folyamatossággal és folytonossággal követhetők. Változatlan és természetes viszonyok között a hidrológiai rendszer állapotváltozásaiban bizonyos törvényszerűségek mutatkoznak: hosszabb időszakot tekintve az egyes állapotjellemzők átlagai, szórásai, szélsőséges értékei, az egymást követő állapotok kapcsolata statisztikai állandóságot mutatnak, a rövid idejű állapotváltozások az így meghatározott egyensúlyi keretek között mennek végbe. A vízjárásnak ezek az egyensúlyi keretek között végbemenő rövididejű változásai éppúgy részét alkotják magának a vízjárásnak, miként az éghajlati változékonyság is része magának az éghajlatnak. A vízjárás akkor változik meg, ha megváltozik az az egyensúlyi keret, amelyben a vízjárás rövid idejű változása végbemegy, azaz egy korábbi egyensúlyi állapothoz képest megváltoznak az állapotjellemzők hosszú időszakra vonatkozó átlagai, szórásai, szélsőséges értékei, az egymást követő állapotok kapcsolatai, egyéb jellemző értékei.

A vízjárás egyensúlyi állapotának megváltozása azt is jelenti, hogy megváltozik a hidrológiai rendszer lehetséges állapot-sorozata, amely a különböző vízgazdálkodási döntések műszaki-hidrológiai előkészítésénél alapként szolgál adott kockázatot vállaló (vagy biztonságot biztosító) mértékadó állapot meghatározásához. Az egyensúlyi állapot megváltozása tehát a mértékadó állapot megváltozását is eredményezi, s ez a változás kényszerít(het)i ki közvetlenül a vízgazdálkodási döntések módosulását, a korábbi egyensúlyi állapotnak megfelelő döntések megváltozását. A vízjárásnak az éghajlati egyensúlyi állapotban végbemenő változások kényszerítő hatására új egyensúlyi állapotra való áttérése - a légköri egyensúlyi állapot változásának egyébként is tranziens jellege miatt (Hoffert et al., 1985) - csak folyamatos lehet. A korábbi és az új egyensúlyi állapotot összekötő átmeneti állapotban a vízjárás ingadozása még jó ideig megmaradhat a korábbi egyensúlyi állapot keretei között, ami a korábbi egyensúlyi állapot fennmaradásának látszatát kelti, és legfeljebb bizonyos szélsőségek gyakoribbá válása figyelmeztethet az új egyensúlyi állapotra való áttérés kezdetére, bizonyosságot pedig csak az jelenthet, ha a vízjárás (átlagos) folyamata kiemelkedik a korábbi egyensúlyi keretek „zajából”.

## A HAZAI VÍZJÁRÁS HOSSZÚ IDEJŰ VÁLTOZÁSAI

A vízjárás az éghajlati elemek időbeli alakulásának egyfajta transzformációja. Ennek a transzformációnak a során számos esetben az éghajlati ingadozások felerősödhetnek; azaz az éghajlati elemek viszonylag kismértékű változékonyságát a vízjárási elemek nagyobb mérvű változékonysága kíséri.

Hazai vízfolyásaink esetében Szesztay (1963) hívta fel a figyelmet arra, hogy folyóink vízhozamai erősebben ingadoznak, mint a vízgyűjtőre hullott csapadék. Ennek okát abban látja, hogy nedvesebb években a csapadéknak általában nagyobb hányada folyik le, mint a szárazabb években. A Tisza vízgyűjtőjében az évi csapadék változékonysági tényezője - a relatív szórás - 0,1-0,3 között míg az évi lefolyás változékonysági tényezője 0,2-0,7 között változik, miközben a két tényező között viszonylag egyértelmű kapcsolat van (Nováky B., 1988). A Zagyva vízgyűjtőjében például a sokévi átlagot tekintve a csapadék területi szélsőségeinek az aránya 1:1,4-1,5, az évi középhőmérsékleté 1:1,3-1,4, ezzel szemben a lefolyásban ez a viszonyszám eléri az 1:10-11-et ! (Nováky B., 1985).

Mivel a transzformációs rendszer általában az éghajlati változékonyság felerősítéséhez vezet - bár a transzformációs rendszer a kis frekvenciájú éghajlati zajokat részben csillapítani is képes -, a vízjárás alkalmas eszköz lehet az éghajlati rendszerben fellépő változások felismerésére (detektálására). Az éghajlati változások detektálására elsősorban a nagy kiterjedésű vízgyűjtők alkalmasak, ahol a vízgyűjtő tározó hatása az éghajlati elemek területi változékonyságának hatását is jelentősen csökkenti.

Az éghajlati változásoknak a vízjárási idősorok alapján történő detektálása számos előnnyel jár, ugyanakkor ennek az eljárásnak több hátránya illetve korlátja is van (a szükséges vízhozammérések száma és megbízhatósága az időben visszafelé haladva fokozatosan csökken; a vízjárás alakulását nagymértékben befolyásolják az emberi beavatkozások is; az egyes éghajlati elemek változása nem vagy alig különíthető el a többi elemétől). Ennek ellenére a vízjárás-jellemzők idősorainak elemzése hasznos eszköz lehet az éghajlati módosulások felismerésében.

## **Hegy- és dombvidéki lefolyás**

A folyók vízjárásának alakulását az időjárás/éghajlati folyamatok változékonysága mellett számottevően befolyásolják az emberi beavatkozások. Nováky B. (1989c) tanulmány részletesen áttekinti a nagyvizekre, a középvízhozamokra, a kisvizekre, a folyók jégjárására, a vízminőség jellemzőire vonatkozó hazai idősorok eddigi vizsgálatainak főbb eredményeit. Az alábbiakban néhány - az éghajlatingadozások szempontjából alapvető - megállapítást emelünk ki.

A vízfolyások nagyvizei számos műszaki-hidrológiai paraméterrel jellemezhetők, azonban az idősor-vizsgálatok a múltban csaknem kizárólag az évi legnagyobb vízállásokra szorítkoztak. Ez az a hidrológiai jellemző, amelyet a nagyvizekhez kötődő vízgazdálkodási tevékenység, az árvízvédelem elsősorban igényel. A mértékadó árvízszinteket az észlelt vízállások empirikus eloszlására illesztett valószínűségi eloszlásfüggvényekből számítják.

A vizsgálatok szerint, a hosszúidejű észlelésekkel rendelkező vízfolyások évi legnagyobb vízállásai a múlt század utolsó évtizedeitől, illetve e század elejétől kezdődően általában homogéneknek tekinthetők, kivételt a Tisza középső szakaszának, a Szamosnak, a Hármas- és Sebes-Körösnek, és a Berettyónak egyes szelvényei jelentenek (Vágás, 1982; VITUKI, 1988). Az inhomogenitás okaira az eddigi vizsgálatok nem derítettek fényt. Az évi legnagyobb vízállások idősoraiban szignifikáns trend - ugyancsak néhány kivételtől eltekintve - nem ismerhető fel. Ugyanakkor az évi legnagyobb vízállások szórása a vizsgált vízfolyásszelvények többségében (60%-ban) trendszerű - többnyire emelkedő - változást mutat (VITUKI, 1988). E trendszerű változások okaira a statisztikai vizsgálatok nem derítettek fényt, csupán feltételezik az emberi beavatkozások hatásait. Hazai vízfolyásainkon kimutatható a hosszabb árvizes és árvízmentes időszakok bizonyos szabályszerűséggel történő váltakozása (Vágás, 1982; Simonné, 1984). Az árvizes és árvízmentes időszakok váltakozásának dacára az évi nagyvizek járásában határozott periodicitás nem ismerhető fel.

Az évi legnagyobb napi vízhozamok hosszúidejű idősoraira vizsgálatok nem készültek a Duna nagymarosi szelvényének kivételével (Lovász, 1986). Az 1883-1980 közötti évek idősorára illesztett regresszió-egyenes az évi legnagyobb napi vízhozamok idősorában jelentős mérséklődő tendenciát igazol. Kimutatható az is, hogy az évi legnagyobb napi vízhozamok megjelenésének időpontja a késő tavaszi-kora nyári időszakról fokozatosan áttevődik a nyár derekára. A vizsgálat következtetései szerint a nagyvizek csökkenésének oka a szélsőséges csapadékoság mérséklődésében van; az árhullámok alakításában pedig nagyobb szerepet kap a csapadékból származó lefolyás a tavaszi hóolvasdásból eredő lefolyással szemben.

Az évi középvízhozamok idősorait illetően elsősorban az idősorokban mutatkozó periodicitásra végeztek vizsgálatokat a múltban. Az összesen 11 folyó 15 szelvényére 32-66 év terjedelmű minták alapján számított autokorrelációs függvények határozott maximumokat mutatnak a 13-14 év környezetében. A Duna nagymarosi szelvényére az évi középvízhozamok idősorának trendvizsgálatát is elvégezték, amely kimutatta az évi középvízhozamok 1883-1980 évek közötti csökkenő tendenciáját (Lovász, 1986). Ugyancsak csökkenő tendencia mutatható ki a nyárvégi-őszeleji hónapok (augusztus-október) havi középvízhozamaiban, míg növekvő az ősz második feléhez és télelőhöz tartozó hónapok (november-december) havi középvízhozamaiban. Ezt a tendenciát a nyárutó és az ősz szárazabbá, a télelő nedvesebbé válásával magyarázzák (Lovász, 1986). Egyes vizsgálatok szerint valószínűsíthető, hogy az évi középvízhozamok évközi ingadozása kapcsolatba hozható a vízgyűjtő évi csapadékanak és évi középhőmérsékletének évközi ingadozásával (Nováky B., 1988).

A Duna nagymarosi szelvényében az évi legkisebb napi vízhozamok az 1880-1980 közötti időszakban emelkedő tendenciát mutattak. Az évi legkisebb vízállások időpontja ugyanezen időszak alatt az év elejétől (januártól) fokozatosan áttevődött az előző év végére, decemberre, ami az évvégi és őszi száraz időszakok mind gyakoribb válását valószínűsíti (Lovász, 1986).

A Duna budapesti szelvényében a jégbeállás gyakorisága és az állójeges napok száma az 1817-1972 közötti időszakban csökkent. Ez a csökkenés a folyószabályozásnak, az utolsó 50 évet tekintve a hőterhelések okozta felmelegedésnek és a vízminőségi változásoknak (Déri, 1985), ill. a hatékonyabb jégrombolási tevékenységnek (Kovács és Károlyi, 1977) tulajdonítható. Az állójeges évek és az állójeges években az állójeges napok számának csökkenését részben a téli léghőmérsékletek növekedésével magyarázzák. A Duna mohácsi szelvényében például az 1935-1976 közötti időszak második felében az állójeges napok száma 176 volt szemben az 1935-1956 közötti 511 nappal. Ugyanezen időszakok összehasonlításában a negatív hőösszeg értéke az időszak második felében mintegy 18 %-kal volt alacsonyabb, mint az időszak első felében. Az állóvizeinkben is számottevően csökkent az állójeges napok, időszakok hossza, a Balaton esetében például átlagosan 49 nap/évről 32 nap/évre. Ezt a csökkenést a vízminőségben bekövetkezett változásoknak tulajdonítják (VITUKI, 1982).

Számos hazai közlemény is utal rá, hogy a vízhozam és a vízminőség, illetve a vízhőmérséklet és a vízminőség között összefüggés áll fenn (Hock, 1983). Következésképpen a vízhozamok vagy a vízhőmérséklet éghajlati változékonysággal összefüggő változásait követniük kell a vízminőségi jellemzők változásainak is. Ugyanakkor a vízminőség változásait - talán a vízjárás minden jellemzőjét meghaladó mértékben - befolyásolják az emberi beavatkozások.

## **Síkvidéki területek lefolyása**

A síkvidéki területek lefolyásának - a belvíznek - időbeli alakulásában fellelhető törvényszerűségeket vizsgálva Kienitz (1966) megállapította, hogy a jelentősebb télvégi-tavaszi belvizek (és belvízkárok) akkor alakulnak ki, ha az őszi csapadék, a téli középhőmérséklet, a tavaszi csapadék és a hótakaró, valamint a hóolvasdás üteme közül három tényező szélsőséges értéket ér el. Egyes vizsgálatok szerint a belvízjárásban mutatkozó évközi ingadozások összefüggésbe hozhatók a napfolttevékenység ingadozásával (Polgár, 1968).

A tavak vízjárását alapvetően az éghajlati elemek alakítják: a tófelületre hulló csapadék és az onnan elpárolgó víz közvetlenül, a tó vízgyűjtőjére hulló csapadék és a térszíni párolgás a tavat

tápláló felszíni és felszín alatti lefolyáson keresztül közvetve. A tavak vízjárása az éghajlat hosszabb idejű ingadozását a vízgyűjtő és a tó tározóhatásának nagyságától függően bizonyos - esetenként többéves - késleltetéssel követi. A tavak vízjárását, az éghajlati hatások mellett sokszor azokat felülmúló mértékben befolyásolják a különböző emberi tevékenységek: részben a vízgyűjtő lefolyási viszonyait megváltoztató emberi beavatkozások, részben a tavat közvetlenül érő emberi beavatkozások. Hazai nagy tavaink például - a Balaton, a Velencei-tó és a Fertő-tó - kivétel nélkül szabályozott vízjárásúak. A szabályozást megelőző időszakban azonban az éghajlati hatás egyértelműen érvényesült. A Balaton vízállásának közelítő ingadozásait mintegy 3000 évre visszamenően sikerült rekonstruálni (Bendefy-V.Nagy, 1969). A tó legmagasabb vízszintjei a 16-17. században alakultak ki, ami egybeesett a kisjégkorszak néven ismert, a mainál hűvösebb és nedvesebb éghajlatú időszakkal. A tó 1866-ban elérte az eddig észlelt legalacsonyabb szintjét. A 19. század hatvanas éveiben a Fertő- és a Velencei-tó teljesen kiszáradt (Bukovszky, 1986), ami éghajlati okokkal magyarázható. A tóvízszintek szabályozása miatt tehát a vízszintek a természetes vízjárás viselkedésének elemzésére közvetlenül nem alkalmasak. Szesztay (1962) ez utóbbihoz a tó víztérfogatváltozásának és a leeresztett vízmennyiségnek az összegzésével előállított természetes vízkészletváltozás idősorait javasolta. A Balaton esetében e természetes vízkészlet változásának 1921-1970 közötti időszakban megfigyelt növekedése részben a vízgyűjtő hozzáfolyásának a növekedésével magyarázható, amelyben alapvető szerepet játszott a karsztvíz süllyesztése során kiemelt vizek felszíni folyásokba történt átvezetése (Kontur, 1979). A természetes vízkészletváltozás növekedését részben a vízfelületi párolgás csökkenése is magyarázza, s ez utóbbi összefügg a párolgást alapvetően meghatározó nyári léghőmérsékletek és a víz hőfok csökkenésével (Déri, 1982). A párolgás csökkenésében az éghajlati tényezők mellett szerepet játszott a tó színének, átlátszóságának, ezekkel együtt albedójának a vízminőségi jellemzők változásaira visszavezethető alakulása.

A térszín és a talajvízszint közötti fedőréteg nedvességtartalmának alakulását az időjárási viszonyok és a talajtani adottságok együttesen szabják meg. Adott helyen, ahol a talajviszonyok (és a növényzet) - természetes körülmények között - gyakorlatilag állandók, a talajnedvesség időbeli változásai lényegében az időjárási elemektől, elsősorban a csapadéktól és a hőmérséklettől (párolgástól) függenek. A talajnedvességtartalom változása gyorsan követi az időjárási folyamatokat. Az éghajlat-változékonyságnak a talaj nedvességtartalmára gyakorolt hatásai jelentősek, e kapcsolat vizsgálatához azonban nem állnak rendelkezésre hosszabb időszakok.

A talajvízjárás alakításában is az éghajlati elemek közül a csapadéknak és a hőmérsékletnek van alapvető szerepe. Ezeknek az éghajlati elemeknek szezonális járása következtében a talajvízszint ingadozása évi ritmust követ. A talajvízszint változása késleltetve és tompítottan követi az éghajlati elemek ingadozását, a késleltetés és a csillapítás annál nagyobb, minél mélyebb a talajvízszint (Ubell, 1959). A vízfolyások közelében a folyótól távolodva egyre csökkenő mértékben és egyre nagyobb időbeli késleltetéssel a talajvíz követi a folyó vízállás-ingadozását. A talajvízjárást számos formában befolyásolják az emberi tevékenységből fakadó hatások és ez megnehezíti az éghajlattal összefüggő talajvízjárási törvényszerűségek felismerését. Az első talajvíz kutakat az 1930-as évek közepén telepítették, s így ma már több, 50 évnél is hosszabb észlelt idősor áll rendelkezésre a talajvízjárás törvényszerűségeinek vizsgálatára. A talajvízállás adatokból eléggé egyértelműen kirajzolódik egy 12-13 éves periódus jelenléte (Kontur, 1985). Az Alföld egyes térségeiben a talajvízállások megemelkedését tapasztalták az 1970-es évek végétől, az 1980-as évek kezdetétől. Az emelkedést a nyári félévi középhőmérsékletek 1965-től kezdődő és 1970-től felerősödő csökkenésével magyarázzák: a csökkenő hőmérsékletek következtében kisebb a talajvizet fogyasztó párolgás (Major és Vargay, 1983). A Duna-Tisza közötti térségben az 1970-es évek közepétől a talajvízszintek folyamatos süllyedése volt tapasztalható. Ez az időszak egybeesett a csapadék csökkenő tendenciájával; de ez csak egyik valószínűsített oka a nagymértékű talajvíz-süllyedésnek. Jelentős mértékben érvényesültek a különböző emberi beavatkozások (erdősítés, rétegvíz kitermelés) hatásai is (Major és Neppel, 1988).

A karsztforrások hozamjárása is szoros összefüggésben van az éghajlati viszonyokkal és mindenekelőtt a csapadékjárással (Scheuer et al., 1985). A karsztvizek utánpótlódása szempontjából elsősorban a téli és őszi csapadékok döntőek (Kessler, 1954). Ugyanakkor a

karsztvizek szintjének járását az emberi beavatkozások a természetes hatásokat sokszorosan felülmúlóan képesek alakítani.

A vízjárás és az éghajlat kapcsolatára vonatkozóan - az eddigi hazai vizsgálatok alapján - a következő összefoglaló megállapítások tehetők:

- A fizikai kapcsolatban nem vagy alig lévő hidrológiai rendszereink vízjárásában megfigyelhető nagyfokú hasonlóság igazolja a közös ok, az éghajlat alapvető szerepét a (természetes) vízjárás folyamatainak irányításában.

- Vizeink járásában az elmúlt 100-200 év során bekövetkezett szinte valamennyi nagyobb léptékű változás döntő mértékben az emberi beavatkozások következménye, az ennél kisebb léptékű változások okainak vizsgálatánál azonban többnyire csak feltételezik az emberi beavatkozások hatását.

- A vízjárásban tendenciaszerűen jelentkező változások okait egyes vizsgálatok az éghajlati tendenciákban keresték, s mutattak rá arra, hogy a vízjárást az éghajlati ingadozások az emberi beavatkozások hatásaival összemérhető, esetenként meghaladó mértékben is módosíthatják. Néhány eredmény e hatás számottevő nagyságrendjét támasztja alá. Így pl. valószínűsíthető, hogy a nyári középhőmérséklet 1°C fokos tartós - tendenciaszerű - csökkenése a talajvizek közel 1 m-es emelkedését eredményezi, a csapadék 1%-os, azaz mintegy 7-8 mm-es csökkenése pedig kiváltja a karsztvízszintek 1 m-es süllyedését.

- Az éghajlat hosszabb idejű ingadozásának vagy változásának kimutatására a legtöbb vízfajta, vízjárási jellemző nem alkalmas az észlelési idősorok rövideksége miatt. A hosszabb időszorral rendelkező vízfolyásainkon a lefolyások tendenciájára az eddig végzett vizsgálatok kevés kivétellel vízállásokra, s mindenekelőtt szélsőséges vízállásokra szorítkoztak. Az éghajlati változások detektálására sokkal inkább alkalmasak lehetnek a vízhozam, s ezen belül is a vízjárásnak a vízhozamokhoz, elsősorban a hosszabb időszakok átlagos vízhozamához kapcsolódó mutatói. Éppen ezért meggyőző - minden egyedülisége ellenére - az egyetlen, vízhozamokra elvégzett tendencia vizsgálat, amelynek középvízhozamokra kapott eredményei egyébként alátámasztani látszanak az éghajlat melegedésének és szárazabb válásának tendenciáját. E vizsgálat eredményét azonban nem tekintjük véglegesnek.

- Következésképpen, a jelenlegi ismereteink szerint a vízjárási tendenciákat tekintve nincsen bizonyíték arra, hogy a hazai éghajlatban az elmúlt 100-200 év folyamán változás következett volna be, vagy változás kezdődött volna, ugyanakkor egyértelmű cáfolat sincs ennek ellenkezőjéről. Emellett biztosak lehetünk abban, hogy az éghajlat a vízjárást számottevően befolyásolja, de nem ismerjük kielégítő mértékben az éghajlat és a vízjárás hosszabb idejű változásai közötti összefüggéseket. Az éghajlat és a vízjárás közötti összefüggések számszerű megfogalmazásai inkább csak a változások rövidebb (elsősorban napi, esetleg havi) időléptékű vonatkozásaiban ismertek. Az összefüggések feltárását nehezíti, hogy az emberi beavatkozások is számottevően, sok esetben az éghajlatét meghaladó mértékben befolyásolják a vízjárást.

## A VÍZJÁRÁS ÉS A VÍZGAZDÁLKODÁS HATÁSVIZSGÁLATAI

A hatásvizsgálatok segítségével az éghajlat változékonyságának, jelenlegi és jövőbeli feltételezett változásának a vízjárásra és a vízgazdálkodásra vonatkozó következményeit becsülik. Az éghajlati folyamatok a vízgazdálkodásra a vízjárásban végbemenő változásokon keresztül fejthetnek ki hatást. A szűkebb értelemben a természetes vízellátottságot, s mindenekelőtt a potenciális vízkészletet jelentő tényező mellett, a társadalom (fogyasztási, öntözési stb.) vízigénye is számottevően függhet az éghajlatingadozásoktól. Végül, magukra a vízgazdálkodási technológiákra (azok tervezésére, üzemelésének hatékonyságára) is hatással lehetnek az egyes éghajlati elemekben végbemenő változások. Nováky B. (1989c) tanulmány behatóan elemzi a vízjárások és a vízigények éghajlat-függésének főbb vizsgálati módszereit és modelljeit; a továbbiakban a legfontosabb megközelítéseket, következtetéseket vesszük sorra.

A vízjárások éghajlati összefüggéseit hosszú ideje vizsgálják területi interpolációs feladatok megoldásához (olyan vízgyűjtő területekre, ahol a hidrológiai mérések hiányoznak); a mértékadó vízjárási jellemzők előállításához szükséges olyan időszakok kiválasztásához, amelyek kellően

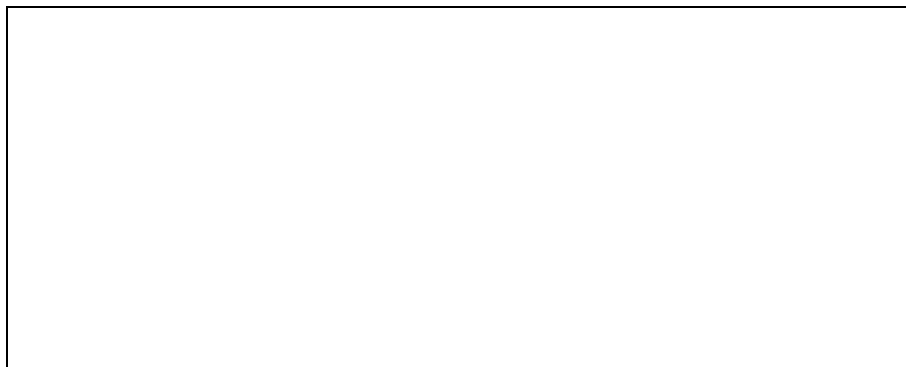
reprezentálják az éghajlat változékonyságát; a vízjárás jellemzőinek előrejelzéséhez (a meteorológiai elemek, állapotjelzők várható alakulásának függvényében). Az említett összefüggések, s mindenekelőtt az éghajlat-lefolyás összefüggés vizsgálatának célja - a 70-es évektől kezdődően - amikor az éghajlat felismert vagy feltételezett változásai egyre inkább kezdik foglalkoztatni a szakembereket - kiterjed az éghajlati hatásvizsgálatokra is. A vízjárás éghajlati hatásvizsgálatai többnyire a vízjárási adatok pótlására, ellenőrzésére vagy a vízjárási jellemzők előrejelzésére kidolgozott eljárásokat, modelleket használják fel. Ugyanakkor ma még nincsenek átfogó tapasztalatok arra vonatkozóan, hogy ezek az eljárások az éghajlat és a vízjárás rövid idejű ingadozása közötti, előrejelzési vagy szimulációs célokból kidolgozott modellek milyen módon és pontossággal hasznosíthatók az éghajlat hosszabb idejű ingadozásaihoz vagy változásaihoz kapcsolódó éghajlati hatásvizsgálatokban.

Módszerüket tekintve a vízjárás éghajlati hatásvizsgálataiban lényegében kétféle megközelítést alkalmaznak: a múltbeli észlelések alapján kiválasztható analógiákat vagy a vízjárási és éghajlati elemek között a múltbeli időszakra vonatkozó észlelések alapján feltárt (regresszió, numerikus vagy konceptuális modell típusú) összefüggéseket.

A vízjárás éghajlati hatásvizsgálatai többnyire csak a felszíni vízfolyásokra és a tavakra terjednek ki, a fedőréteg nedvességtartalmára és a talajvizekre, általában a felszín alatti vizekre vonatkozóan éghajlati hatásvizsgálatot csak elvétve találni. Hazánkban is csupán a felszíni vizekkel kapcsolatban történtek kísérletek éghajlati hatások vizsgálatára igen elenyésző számban. Ugyanakkor szinte teljesen hiányoznak a szélsőséges vízjárási jellemzők éghajlati hatásvizsgálatai (Callaway és Currie, 1985), s ennek az oka elsősorban az, hogy az ezekhez szükséges szélsőséges éghajlati eseményekre az éghajlati modellek általában nem terjednek ki (Eybergen és van Huis, 1987).

Az éghajlati hatásvizsgálatok - különféle analógiás, regressziós, koncepcionális modellek alkalmazásával - többek között a következő eredményekre vezettek. A lefolyás (különösen az arid és a szemi-arid klímájú területeken) igen érzékeny az éghajlatingadozásokra; a vízjárás egyes jellemzői „felnagyíthatják” az éghajlati elemekben végbemenő változásokat, így például a Zagyva vízgyűjtőjére végzett vizsgálatok szerint a csapadék 5%-os növekedése a lefolyás mintegy 17%-os növekedését eredményezheti (Nováky B., 1985); az éghajlat melegebbé és szárazabb válását (az átlagos évi középhőmérséklet 1-2%-os növekedését, illetve az évi csapadék 5-10%-os csökkenését) feltételező éghajlati változások eredményeképpen az átlagos évi lefolyás 7-34%-os csökkenésével lehet számolni; a lefolyás változékonysága akkor is növekszik, ha a csapadék változékonysági tényezője ugyan állandó, de az átlagos évi csapadék változik, továbbá, hogy az évi lefolyás az évi csapadéknál nagyobb mértékben ingadozik (Ratkovics, 1976; Schaake és Kaczmarek, 1979); a szélsőséges hidrológiai eseményekben akkor is bekövetkezhetnek a változások, ha az éghajlati változások hatására maga az éves lefolyás nem változik (Gleick, 1987). A tavak és tározók vízforgalmának éghajlati hatásvizsgálatai visszavezethetők a lefolyás éghajlati hatásvizsgálataira: ehhez a vízgyűjtőről eredő hozzáfolyást kell az éghajlati változásoknak megfelelően modellezni az előzőekben részletesen tárgyalt eljárások valamelyikével.

Az éghajlat szárazabb és melegebbé válása például a Balaton vízforgalmát is jelentősen megváltoztathatja. A Balaton természetes vízkészletváltozásának valamint a meteorológiai elemek (csapadék, hőmérséklet) változásának kapcsolata jól nyomon követhető a 10. ábrán (Nováky B. et al., 1985). A Balaton térségében az átlagos évi középhőmérséklet 1°C fokos növekedésével a tó mai - szabályozott - állapotát jellemző 0,74-es kifolyás/párolgás arány 0,45-0,55 körüli értékre csökken le, azaz a tó vízforgalma némileg lelassul és ennek következtében a tó sóartalma is mintegy 50%-kal növekedhet (Nováky B., 1989).



10. ábra A csapadék és a hőmérséklet sokévi átlagostól való eltérésének folyamatos összege és a Balaton természetes vízkészlet-változásának folyamatos összegei

Broewer és Falkenmark (1988) Európa vízkészletére elvégzett vizsgálata abból az éghajlati egyensúlyi állapotból indult ki, amely a légkör széndioxid-tartalmának az ipari forradalom előtti állapotához képest a megkétszereződését feltételezi. Az éghajlati változások modellezésére az angol Meteorológiai Szolgálat által kidolgozott UKMO modellt (Mitchell, 1983) alkalmazták. Az UKMO-modell szerint Európa északi országaiban a felmelegedés 2-4 °C fok között, középső és déli országaiban 2 °C fok alatt várható. Az 50 fok szélességi körtől északra fekvő országokban az évi átlagos csapadék növekedését, míg a szélességi kör alatt csökkenését jelzik előre. Az éghajlati modell által előrejelzett éghajlati változások hidrológiai hatásainak becslésére Olejnik (1988) eljárását alkalmazták. A számítások szerint Európa 13 országában - köztük hazánkban is - az átlagos évi vízkészlet jelentős csökkenése állhat elő.

A vízjárás éghajlati hatásvizsgálatainak eredményei alapján megállapítható, hogy a különböző vízellátási célokra felhasználható felszíni vízkészlet (s mindenekelőtt a potenciális vízkészlet), a vízfolyások vízkészletéhez kapcsolódó vízerőkészlet, a lefolyás rövid idejű ingadozásának tompítására szolgáló tározások, a tavak tőfelülethez, tóvízszinthez, esetleg vízminőséghez kapcsolódó hasznosításai, a vízfolyások vízszállításai érzékenyek az éghajlati változásokra. Különösen fontos, hogy mennyire érzékeny a potenciális vízkészlet, s hogyan alakul ennek a nagysága az éghajlati változások esetén.

A vízjárás elemzése mellett az éghajlati hatásvizsgálatok kevés figyelmet fordítottak a vízigények éghajlati összefüggéseire (Chen és Parry, 1987). A vízigények távlati előrejelzésénél alapvető probléma, hogy a széndioxid növekedésének milyen közvetlen hatása lesz a vízigényekre. További probléma, hogy a népesség, a gazdaság, és az intézményi rendszer miképpen hat a vízigényekre (Callaway és Currie, 1985). Hosszabb távon a különböző gazdasági tényezők az éghajlati hatásokat meghaladó mértékben befolyásol(hat)ják a vízigényeket.

Az éghajlattól függő vízigények közül elsősorban a növények öntözővíz-igénye számottevő, amelynek nagysága alapvetően befolyásolhatja egy térség vízgazdálkodását. Az öntözővíz mennyisége természetesen az öntözött területtől és az öntözött növény fajlagos vízigényétől (vízigényességétől) függ. Czelnai (1980) a lehetséges éghajlati változások hatásait az Alföld mezőgazdaságára elemezte. Az éghajlat szárazabb válása szerinte oda vezethet, hogy csökken a nagyobb nedvességet igénylő takarmánynövények (kukorica, lucerna) részaránya, több növény, amely ma is a természethatóságok határán van, kiszorul a hazai területekről, s helyette mások terjedhetnek el. Callaway és Decker az Egyesült-Államok-beli Iowa állam délnyugati vízgyűjtőiben vizsgálták a feltételezett éghajlati változások hatásait az öntözővíz-igényre. A vizsgált terület a szubhumid és szemiárid éghajlati adottság határán helyezkedik el, s mint marginális terület kiváltképp érzékeny lehet az éghajlati változásokra. Az éghajlati hatásvizsgálatokban az átlagos hőmérsékleti növekedés 2°C fokos volt, a nyári csapadék 10%-os csökkenése mellett és a tavaszi csapadék 10%-os növekedése mellett (azaz a mainál nedvesebb tavaszokat szárazabb nyarak követik). Az új éghajlati állapotnak megfelelően számították az

öntözővíz igényeket a mai éghajlati állapotra kidolgozott képletekkel. Az éghajlat feltételezett változásainak megfelelően az öntözővízigény 80%-os növekedését jelzik előre (Decker et al., 1985). Hazánkban Antal (1987) vizsgálta, hogy milyen következményekkel járhat a mezőgazdaság számára a lehetséges éghajlati változás. A csapadék növekedésével együttjáró hőmérséklet növekedés az éghajlati vízhiány növekedéséhez, a növények természetes vízellátottságának romlásához, s ezekkel együtt az öntözővíz-igény növekedéséhez vezet.

### **3.3. A NÖVÉNYTERMESZTÉS ÉGHAJLATI FELTÉTELEI, AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS LEHETSÉGES REGIONÁLIS AGROMETEOROLÓGIAI KÖVETKEZMÉNYEI**

A mezőgazdaság és ezen belül is a növénytermesztés a leginkább időjárás- és éghajlatfüggő társadalmi-gazdasági tevékenység. A meteorológiai tényezők területi eloszlása és időbeli változása számos formában hat: egyéb természeti és technológiai feltételek mellett meghatározza a termőhelyi viszonyokat, a növény fejlődését, a produktivitást és a konkrét produkciókat, a szélsőséges jelenségeken keresztül korlátozza a növénytermesztést. Az állattenyésztésre gyakorolt hatások részben (és döntően) közvetetten, például a takarmányellátottságon, legelőgazdálkodáson keresztül, részben pedig közvetlenül érvényesülnek.

Az agrotechnika fejlődésével, az egyre korszerűbb technológiai eljárások alkalmazásával, a biológiaiilag értékesebb és ellenállóbb fajták termesztésbe állításával valamelyest csökkent a mezőgazdaságnak a meteorológiai körülményektől való függősége. E függőség azonban alapjában véve megmaradt. Sőt, minthogy az egy hektárra eső termelési érték rendkívüli módon megemelkedett, az időjárás által okozott károk is egyre magasabb értékűek lettek (Antal, 1987). (E megállapításoknak részben ellentmond Oram (1985) érvelése: szerinte a mezőgazdasági rendszerek bonyolultabbá válásával azok kevésbé „rugalmasak”, másszóval az éghajlati fluktuációkra is érzékenyebbek lettek, szemben a természetes körülmények között található ökorendszerekkel, vegetációval. Tehát, Oram szerint nemcsak abszolút mértékben, hanem egységnyi termelési értékre nézve is növekedett a növénytermesztés éghajlati függősége.)

A növénytermesztés meteorológiai feltételeit, sőt az éghajlatingadozások hatásait is régóta vizsgálják, az esetleges éghajlatváltozások következményeinek felmérése viszont újkeletű kutatási téma. Az antropogén klímaváltozás lehetőségének kutatása és a területhasznosításra, a növénytermesztésre (közvetve pedig az élelmiszergazdaságra) gyakorolt hatásoknak a feltárása az elmúlt két évtizedben rendkívül intenzívvé vált. A nemzetközi együttműködés fórumai (WCC, WCP, IIASA, ICSU-IGBP és IPCC, ld. 5.fejezet) mellett, de azokkal összhangban nemzeti hatáselemzési programok is készültek. A téma fontosságát (beleértve az élelmezési problémákat) már a Római Klub 1972-es nevezetes „A növekedés hatásai” című tanulmánya is kiemelte. Külön nemzeti programot indított a Szovjet Hidrometeorológiai és Környezetvédelmi Állami Bizottság. A japán kormány Környezeti Hivatala tanácsadó testületet hozott létre, amely többek között hangsúlyozta (Kitano, et al., 1988): „Mint a modellek előrejelzik, a csapadék... csökkenni fog a közepes szélességeken. A párolgás ezen a területen növekszik. Ezek a változások jelentős hatással lesznek... egyaránt az ökorendszerekre és a mezőgazdasági termőterületek, az erdők, a legelők produktivitására.” Az USA-ban e kérdésekre a figyelmet többek között az 1980-ban készült „Global 2000: jelentés az elnöknek” című tanulmány hívta fel. Az 1987-től kibontakozó kanadai éghajlati hatáselemzési program átfogóan foglalkozik mezőgazdasági kérdésekkel mind a farmgazdaságok szintjén, mind regionális szinten (CCD, 1987).

A várható hatásokkal kapcsolatban már számtalan feltételezés, becslés látott napvilágot. Ezek részben ellentmondóak, részben nagyságrendi különbségeket is tartalmaznak. Következésképpen a hatásvizsgálatokkal kapcsolatban el kell kerülni a megalapozatlan alul- és felülbecsléseket. Mind tudományos, mind pedig gyakorlati szempontból különösen a mezőgazdasági, élelmezési következmények eltúlzása veszélyes. A kutatási eredmények reális értékelésére van szükség úgy, hogy a becslések körülményei, feltételezései, bizonytalanságai is mindig bemutatásra kerüljenek.



A meteorológiai feltételekről, ingadozásaik hatásáról tehát gazdag ismeretanyag halmozódott fel; az adott feltételek között feltárt összefüggések adják a kiindulási alapot a jövőbeli változások hatásainak becsléséhez. Emellett az alábbiakban röviden áttekintjük a változások lehetséges szenárióit és mezőgazdasági következményeit, a meglévő módszerek és modellek alkalmazásának lehetőségeit és korlátait, valamint az éghajlat változékonyságával és esetleges változásával kapcsolatos hatékony alkalmazkodás elvi és módszertani kérdéseit.

## **Az éghajlat változékonysága és mezőgazdasági hatásai**

Éghajlatunk területi és időbeli eltérései, az éghajlati elemek idősoraiban megfigyelhető évi (évszakos) menet, éves, évközi vagy még nagyobb időléptékű ingadozások nagymértékben befolyásolják a mezőgazdasági termelés módját és eredményességét. Az elmúlt évtizedekben a mezőgazdasági termelés hatékonysága rendkívülien megnőtt, a természeti környezet elemeinek változékonyságával szembeni érzékenysége azonban - a technológiai fejlődés ellenére - megmaradt. A növénytermesztés intenzitásának, a terméshozamoknak a növekedése azt is jelenti, hogy a becslések szerint a relatív produkció-ingadozások általában csökkentek, a meteorológiai okokra visszavezethető anomáliák abszolút mennyiségben azonban jelentősen nőttek. Az elmúlt évtizedek megfigyelései alapján a terméshozamok változékonyságának mintegy harmada „magyarázható” meteorológiai okokkal (Szász, 1987; a szerző az éghajlat, a talaj és az agrotechnika-genetika jellemzőinek 27-23-50 illetve 34-20-46 %-os hatásarányait közli a búza- és a kukoricatermesztésre). A meteorológiai tényezők, jelenségek számottevő hatását újra megerősítették az elmúlt évtized aszályai, amelyek különösen az alföldi területeket sújtották. Hasonló jelenségek és az éghajlati kutatások iránti igény erősödése volt megfigyelhető a világ más térségeiben is.

Hazánkban a fény- és hőellátottság lényegében nem korlátozza a növénytermesztést, szemben az éghajlatilag nem kielégítő mértékű és erősen változékony nedvességellátottsággal. Különösen az Alföld térsége - amely szemiárid és száraz szubhumid klímájú - rendkívül érzékeny a csapadék változékonyságára.

Az aszály, a növények vízigény-kielégítettségének mértékét kifejező agrohidropotenciál kérdéseit tekinti át Petrasovits, (1989). E tanulmány szerint az éghajlat ingadozása: egyrészt az agrohidropotenciál változásán keresztül - más tényezők mellett - alapvető hatással van az adott terület agroökopotenciáljára, másrészt általában elsődleges oka a növényi produkciót csökkentő aszályok változó gyakoriságának és intenzitásának.

A vízellátottsággal a növények tápanyaggazdálkodása szorosan összefügg; a vízhiány korlátozhatja akár a talaj tápanyagkészletének, akár az alkalmazott műtrágyáknak a hatását. Az éghajlat ingadozása és az ezzel többek között együttjáró évi, évközi vagy hosszabb időskálájú csapadékmennyiség vagy talajnedvesség változás a tápanyaghasznosuláson keresztül is módosíthatja a növényi produkciót, annak sokévi trendjét és változékonyságát. A tápanyagfelvétel folyamatában természetesen szerepet játszanak az egyéb meteorológiai, éghajlati feltételek is.

A szélsőséges meteorológiai jelenségek gyakorisága, intenzitása és káros hatásai egyrészt kifejezik az éghajlat természetes változékonyságát, másrészt - sokszor félrevezetően - felhívhatják a figyelmet a klíma tendenciaszerű, de összességében alapvető megváltozására is. A legnagyobb károkkal járó rendkívüli jelenség az aszály. Intenzitása, tartóssága (perzisztenciája), gyakorisága is lehet szélsőséges. Egy viszonylag hosszabb, közel átlagos vízellátottságú időszak után (a 60-as évek közepétől kezdődően), 1976 és 1986 között hat olyan esztendő fordult elő, amikor legalábbis az Alföld déli területein szélsőséges szárazság volt megfigyelhető. A mezőgazdasági aszályok változó gyakorisága az éghajlatingadozás jele, de nem feltétlenül az éghajlat változásának bizonyítéka. A súlyos károkat - termés kiesést - okozó aszály mellett külön említést érdemel egy másik szélsőséges meteorológiai jelenség, a téli, tavaszi, késő őszi fagy, mely különösen a gyümölcs- és szőlőtermesztés eredményességére lehet számottevő hatással.

A különféle időjárás-növény modellek, statisztikai összefüggésvizsgálatok segítségével megállapítható, hogy a legtöbb gazdasági növény esetében az időjárás átlagos terménynövelő és terméscsökkentő hatása eléri vagy meghaladja a 20 százalékot (Varga-Haszonits, 1987).

A növénytermesztés szempontjából a légköri feltételeket a meghatározó természeti erőforrások egyik alrendszerének is tekinthetjük. A légköri erőforrásokhoz döntően a sugárzási és a termikus viszonyokat sorolják, ugyanakkor a meteorológiai viszonyok fontos szerepet játszanak a hidrológiai ciklusban is. A különféle erőforrások együttesen határozzák meg az agroökológiai potenciált, másszóval az adott természeti feltételek között elérhető maximális növényi produkciót (Petrasovits, 1987; Szász, 1987). Az agroökológiai potenciál jelentékenyen függ az éghajlati elemektől. E potenciál meghatározására többféle eljárás ismeretes. Williams (1985) - másokhoz hasonlóan - a teljes (potenciális vagy maximálisan elérhető) szárazanyag-produkciót jellemezte a különféle meteorológiai elemek függvényében; majd ez utóbbiak változtatásával az éghajlatváltozás következményeit becsülte (nyugat-kanadai területre).

Az éghajlat változékonysága és méginkább annak ingadozása megnyilvánul a vegetációs időszak kezdetének, végének, hosszának változásában is. A hőmérséklet adott évszakos menetét feltételezve, valamilyen bázishőmérséklet megadásával e periódus éghajlati jellemzői egyszerűen kiszámíthatók (Varga-Haszonits és Harnoss, 1988). Az egyes években azonban e jellemzők nagymértékben módosulhatnak.

Az éghajlatingadozásnak a növénytermesztésre gyakorolt hatásait egyszerű statisztikai összefüggéselemzésekkel vagy különféle növény-éghajlat modellek segítségével vizsgálják. E módszerek révén első- vagy másodfajú előrejelzések, scénáriók, érzékenységvizsgálatok is elvégezhetők (pl. Biswas, 1980).

## **Az éghajlatváltozás regionális scénáriói a növénytermesztés szempontjából**

Az 1988-as villachi konferencián a hatásvizsgálatok kiindulási alapjaként elfogadott globális éghajlati scénáriók (2.4. pont) lehetővé teszik hasonló léptékben az esetleges következmények felmérését - többek között - a vegetáció vonatkozásában is.

Az éghajlati scénáriókra épülő előzetes vizsgálatok szerint hosszabb távon a jelentősebb hatások a természetes körülmények között - az emberi beavatkozásoktól többé-kevésbé mentes területeken - található ökoszisztemeket, mindenekelőtt az erdőket érintik. Akár a természetes, akár az ember által végrehajtott „adaptáció” szempontjából lényeges, hogy a jelenleg feltételezett globális változások üteme jelentősen felülmúlhatja a múltban tapasztaltakat.

A regionális hatásvizsgálatok elvégzéséhez még bizonytalanabb a kiindulási alap: vagy az említett globális scénáriókkal párhuzamosan becsült regionális klímaképekre vagy a közvetlenül - például „egyensúlyi analógiákkal” (ld. 2.2. pont) - előállított regionális scénáriókra támaszkodhatunk. Hasonló vizsgálatok készültek már különféle régiókra úgy, hogy - különösen az 1988-at megelőző időszakban - egy-egy meghatározott klímamoddellel származtatott scénárióból indultak ki vagy egyszerűen érzékenységi hatásvizsgálatot végeztek a jelenlegi klíma különféle mértékű „perturbálásával”.

Különösen a növénytermesztés területén az elmúlt évtizedekben számos olyan modellt fejlesztettek ki, amelyek segítségével - más tényezőkkel együtt - az időjárás, illetve az éghajlati elemek természetes változékonyságának hatását vizsgálták a növények fejlődésére vagy közvetlenül valamely gazdasági növény terméshozamára. Az éghajlatváltozási hatásvizsgálatok döntő többsége ezekre a korábban kialakított modellekre támaszkodik. A klímaváltozások azonban olyan regionális éghajlati feltételeket eredményezhetnek, amely alapvetően különbözik a jelenlegi vagy a (közel-) múltban megfigyelt éghajlattól. Az egyik legfontosabb különbség az, hogy nem egyszerűen valamely meteorológiai elem jellemzőinek esetleges megváltozásáról van szó, hanem egyrészt (a felszínközeli légrétegben is) változik a légkör összetétele, másrészt a növényi fejlődés szempontjából lényeges meteorológiai-éghajlati elemek mindegyike megváltozhat a jövőben.

Az éghajlat változékonyságához vagy korábbi (a történeti időszakokban végbement) ingadozásaihoz képest a jelenleg feltételezett változás nagyobb mértékű és lényegesen gyorsabb lehet úgy, hogy a változékonyság (az évi, évközi fluktuáció, az éghajlati „zaj”) és ezzel együtt a szélsőséges jelenségek jellemzőinek módosulásával is számolni kell (Glantz és Wigley, 1987).

A villachi scenáriók szerint a globális hőmérsékletnövekedés 2000 és 2050 között 0,8, 0,3 és 0,06 °C/évtized, a közepes szélességeken pedig a nyári félévre a globális érték 0,8-1,0-szerese, a téli félévre pedig azok 1,2-1,4-szerese várható. A többi meteorológiai elemmel kapcsolatos feltételezések még ennél is bizonytalanabbak. Mivel a jelenlegi éghajlati körülmények között a nedvességellátottság a növénytermesztést leginkább korlátozó éghajlati tényező, ezért alapvető jelentőségű, hogy a scenáriók legalábbis a nyári félévre a csapadék mennyiségének csökkenésére utalnak. E jelenség elsősorban a hőmérséklet növekedésével erősödő mértékű evapotranspirációnak tulajdonítható.

A mezőgazdaság szempontjából fontos éghajlati jellemzők várható változására hazánk területére is készültek előzetes becslések. Ezek részben a nagy kutatóközpontokban kifejlesztett éghajlati modellekből, az itthon is megkezdett modellezési tevékenységek eredményeképpen, valamint a globális és a regionális változások empirikus-statisztikai egybevetéséből származtathatók. Az utóbbi utat követve, Mika (1988) kismértékű (0,5 °C fokos) globális felmelegedést feltételezve azt becsülte, hogy térségünkben a téli félévben hasonló mértékű, a nyári félévben pedig mintegy 0,5-1,0 °C fokos hőmérséklet-növekedés mellett a (nyári) napfénytartam 10 %-os növekedése, ugyanakkor a csapadék 10-15 %-os csökkenése és végül a tavaszi és őszi fagyok ritkulása várható. Ennél nagyobb mértékű globális változások regionális hatásai a megfigyelési sorokból elvileg nem becsülhetők; arra csak a klíma-modellekkel nyújtanak lehetőséget.

A scenáriók regionális következményeinek agrometeorológiai értelmezése annak feltételezésére vezet, hogy megváltozhatnak az adott növények éghajlatilag optimális (és lehetséges) termőhelyei többek között azzal összefüggésben, hogy módosul egy-egy régióban a hőmérsékletileg lehetséges vegetációs periódus kezdete, hossza, hőellátottsága; módosulhatnak a növényi fejlődés szempontjából lényeges káros meteorológiai jelenségek jellemzői (gyakoriság, intenzitás); változhatnak az egyes gazdasági növények átlagos produktói illetve azok éves változékonysága a produktivitást meghatározó meteorológiai tényezők esetleges tendenciaszerű változásával.

A legtöbb vizsgálat - akár globális léptékben akár konkrét területekre - a felszíni hőmérséklet és a csapadékmennyiség várható változására vonatkozik. Mint korábban már említettük, a legtöbb esetben világosan megkülönböztetik az „átmeneti” és az „egyensúlyi” klímaállapot jellemzőit. A főbb elemek változó értékéből, időbeli menetéből következtetnek a velük szorosan összefüggő olyan paraméterekre, mint például a „hőmérséklet-összeg” („hőösszeg”, másképpen a vegetációs időszakra számított hőfokhíd valamely bázishőmérsékletre), vagy a felszíni vízmérleg különféle összetevői (evapotranspiráció, talajnedvesség), illetve a különféle szárazsági/nedvességi indexek. A lehetséges következményeket részletesen vizsgálta Boncz és Mika (1984), valamint Mika (1986,1988).

A különböző éghajlati időléptékekben az egyes éghajlati elemek változékonysága is ingadozhat, illetve - egy éghajlatváltozás keretében - változhat. A változékonyság esetleges fokozódása nyilvánvalóan növelné az adott régió növénytermesztésének érzékenységet. E probléma vizsgálatával eddig igen kevesen foglalkoztak; Mearns et al. (1984) és Katz (1988) bemutatták annak a lehetőségét, hogy éghajlati idősorok szimulációjában milyen hatással járhat a „zaj” paramétereinek (pontosabban, szórásának) megváltoztatása; Mearns et al. (1988) pedig egy éghajlati numerikus modell eredményeiből próbáltak következtetni a feltett éghajlatváltozási scenárióban a változékonyság jellemzőire.

A szélsőséges meteorológiai jelenségek - és ezek sorában különösen azok, amelyek a növénytermesztés szempontjából károkat okoznak - végsősoron kockázati tényezők és akár egy tartósabb éghajlingadozás során, akár az éghajlatváltozás során az ilyen „rendkívüli” jelenségek gyakoriságának változásával kell számolni. E változások egyben kísérőjelenségei és indikátorai a globális változásnak. Mindkét értelmükben, de akár rizikóelemzési szempontból is a szélsőséges jelenségek egyik sajátossága, hogy „erősen nemlineárisak” (az egyes meteorológiai változók átlagos értékeinek változásával). E sajátosság egyrészt fontos módszertani következményekkel jár

(Hoyt, 1981; Katz, 1989; Faragó, 1989), másrészt a káros jelenségek jellemzőinek változása rendkívül fontos a mezőgazdasági hatáselemzés szempontjából is (Parry, 1985; Mearns et al., 1984). Ez utóbbiak sorában kitüntetett szerepe van az aszálynak, a magas hőmérséklettel vagy alacsony nedvességtartalommal járó stresszállapotnak, a már említett - a különböző évszakokban jelentkező - fagyoknak stb.

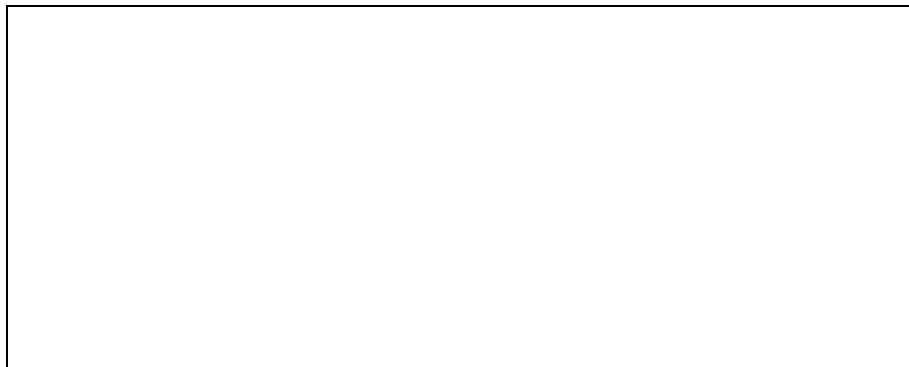
A meteorológiai lehetséges vegetációs periódus hosszát különböző bázishőmérsékletekre számítják ki. E tartam jól becsülhető a havi adatokból (középhőmérsékletekből). Ha feltételezik, hogy a hőmérséklet évi menete egy globális változás esetén nem módosulna, akkor az évi középhőmérsékletekben feltételezett változásnak a vegetációs időszakra gyakorolt hatása egyszerűen becsülhető: 1 °C fokos változás mintegy 10 nappal változtatná meg e periódus hosszát (Varga és Harnoss, 1988). Hasonlóképpen a száraz időszak kezdete, vége illetve hossza is becsülhető - valamely ariditási index kiválasztásával. E célra kézenfekvő a potenciális evapotranspiráció és a csapadékmennyiség viszonyát vizsgálni, s száraz időszaknak tekinteni azt a periódust, amikor az előbbi meghaladja az utóbbit. Varga és Harnoss (1988) vizsgálatai szerint az évi csapadékmennyiség 10 %-os változása az említett időszakok hosszának mintegy 10 nappal való rövidülését vagy meghosszabbodását eredményezheti. Más vizsgálatokból ugyanakkor kitűnik, hogy a meteorológiai elemek évi menete is számottevően módosulhat. A regionális éghajlat változását azonban nem célszerű ilyen feltételek mellett vizsgálni, a különféle modellekkel levezetett scenáriók többek között a hőmérséklet vagy a csapadék évi menetének jelentős módosulására is utalnak.

A globális változások úgy is felfoghatók, hogy az éghajlati övek és ezzel a növénytermesztési régiók is elmozdulnak. A mérsékelt öv déli területein az evapotranspiráció növekedése lenne - a becslések szerint - olyan domináns tényező, ami a növényi produktivitás csökkenésére vezetne. Ezzel szemben e térség északi területein az „eredő” hatás pozitív lenne a vegetációs időszak meghosszabbodásával. A mezőgazdaságot érintő globális és összesített hatás „előjele” is, annak mértéke pedig végképp bizonytalan. Ezért célszerű részletesebben csak egyes scenáriók és régiók vonatkozásában foglalkozni a lehetséges következményekkel (mint feltételes hatáselemzéssel). Az adott értelmezésben térségünk éghajlatának változása azt jelentené, hogy a jelenlegi mediterrán övezet északabbra tolódna, ami enyhébb télel, melegebb és szárazabb nyárral járna együtt.

Marginalitás. Az éghajlatváltozás különösen a „határhelyzetű” növények illetve területek esetében eredményez(het) szélsőséges következményeket. Ez különösen érvényes lehet pl. szemiárid területeken, a hegyvidékes területeken a magasabban fekvő régiókban, illetve általában ott, ahol valamely éghajlati erőforrás (jelenleg) valamely növényfaj természetességét minimálisan elégséges mértékben biztosítja. Hazánkban pl. hóellátottság tekintetében ilyen természetességi határhelyzetben van a szőlő, a dohány, a rizs vagy a fűszerpaprika, a késői fagyok - mint éghajlati rizikótényező - miatt a csonthéjas gyümölcsök egy része (Antal, 1986). E növények szempontjából tehát a feltételezett regionális melegedés előnyös lenne, ugyanakkor a várhatóan csökkenő (nyári) csapadék végeredményben jelentősen csökkenti e növények számára is az éghajlati potenciált az adott térségben. A marginalitás problémájának elemzését Parry és Carter (1985) Dél-Skócia felföldi területeire végezte el, felismerve, hogy ez egy rendkívül jellemző marginális térsége a zabtermesztésnek (a termesztés magassági szintjének változása az éghajlatingadozás analógiáját képezi, egy meghatározott magassági szint ugyanis egyszerűen a természetesség fiziológiai határát adja, ami jól „szimulálja” az éghajlati övek és ezzel együtt a növénytermesztési területek eltolódását egy éghajlatváltozás esetén).

A várt éghajlatváltozás elsősorban az „üvegház-gázok” légköri koncentrációjának növekedésére vezethető vissza. A légkör összetételének változása önmagában is közvetlenül és számottevő hatással van a növények fejlődésére. Az ózon - amelynek mennyisége a felszín közelében, a troposzférában az emberi tevékenység nyomán gyarapodik - kifejezetten mérgező a növényekre. Hosszabb tartózkodási ideje, növekvő „egyenletes” eloszlása miatt azonban a kibocsátott gázok közül a legnagyobb hatása a széndioxidnak van: a növények fejlődésének szempontjából ez kifejezetten pozitív hatás (Idso, 1980; Szász, 1981). Azonkívül a nagyobb széndioxid-koncentráció mellett a növények vízhasznosítási hatékonysága számottevően növekszik, ami különösen azokon a területeken lenne fontos tényező, ahol már ma is a növénytermesztést

leginkább korlátozó éghajlati erőforrás a nem kellő mértékű természetes vízellátottság. A légköri széndioxid-mennyiség további 100-300 ppm nagyságrendű növekedésének határán belül - a különböző laboratóriumi és numerikus vizsgálatok szerint - minden 1 ppm növekedés a fotoszintézis hatékonyságának kb. 0,5%-os növekedésével jár együtt (Wittner, 1980; Rosenberg, 1981). 1982-ben kiterjedt vizsgálatokat hajtottak végre a világ 800 laboratóriumában, hogy bizonyos növényfajták terméshozama hogyan alakul abban az esetben, ha a légkör széndioxid tartalma a jelenlegi szint kétszeresére növekszik. E vizsgálatok eredményeit szemlélteti a 11. ábra. A vizsgált esetekben a termésmennyiség százalékos növekedési aránya 4 és 104% között változik a növényfajták függvényében. Emlékeztetőül megismételjük, hogy 1850 óta a légköri széndioxid-koncentráció 270 ppm-ről napjainkig 340 ppm-re növekedett. A jelenlegi trendek szerint 2050-re 500 ppm-t meghaladó koncentráció várható. A növényi produktivitás változására emellett azonban nagyon sok tényező hat, s e hatások szétválasztása csak korlátozottan lehetséges. Más becslések szerint a széndioxid-koncentráció megduplázódása (ti. a 270 ppm-es szinthez képest), a többi meteorológiai tényező változatlansága mellett például a kukorica, a cirok és a cukornád terméseredményét 0-10 %-kal, a búzáét, a szójaét és a rizsét 10-50 %-kal növeli (Antal, 1986).



11. ábra Becsült terméshozam növekedés a légköri szén-dioxid koncentráció növekedése esetén

Az említetteken kívül a mezőgazdasági hatáselemzésnek számos egyéb vetülete van (területhasznosítás, növényi kártevők, talajerózió stb.).

Következésképpen egyfelől - amint ezt már a „korai” éghajlati scenáriók is jelezték - a növénytermesztés bizonyos kulcsfontosságú mérsékelt övi területein a melegebb és szárazabb klímának jelentős negatív hatásai lehetnek, másfelől a széndioxid mennyiségének növekedése kifejezetten előnyös a növények szempontjából (Kellogg és Schware, 1982). Akár a globális, akár a regionális változások és „eredő” hatások tekintetében a becslések bizonytalansága igen nagy és emiatt további intenzív kutatásokra van szükség.

### **Felkészülés, alkalmazkodás, mezőgazdasági politika**

A környezet változásaival kapcsolatos emberi tevékenység fő formái: a megelőzés, a (negatív) hatások mérséklése, az alkalmazkodás. E „válaszoknak” sajátos jelentősége van a - mindenekelőtt az időjárási/éghajlati fluktuációknak kitett - mezőgazdaság esetében.

Időbeli folyamatát tekintve a tágabb értelemben vett adaptáció vagy evolúciós vagy pedig (tudományosan) tervezett. Ebben a megközelítésben végsősoron az emberi megismerés és az ismeretek alkalmazásának különböző szintjeiről van szó. A hatásmechanizmus többrétű, a válasz-stratégiák sokfélék. E kérdések elvi hátterét, szintjeit és összefüggéseit behatóan tanulmányozta többek között Czelnai (1980). Megállapítása szerint, például a megelőzés is típusokra bontható aszerint, hogy a környezeti - és speciálisan az éghajlati rendszerben - végbemenő változásokat kíséreljük megakadályozni vagy módosítani illetve a hatást közvetlenül „elszenvedő” terület, folyamat, tevékenység érzékenységet csökkentjük.

A jelenleg feltételezett antropogén eredetű éghajlatváltozás több szempontból is eltér(het) a múltban tapasztalt változásoktól, ami azt is jelenti, hogy a tágabb értelemben vett alkalmazkodás, felkészülés sem szorítkozhat a történeti idők során megszerzett tapasztalatokra. A feltételezett fő különbségek: a változás sebessége, a változás antropogén okainak megszüntetésére irányuló tevékenység eredményessége illetve az a tény, hogy a (kibocsátásokra, felszínmódosításra stb. vonatkozó) korlátozás éghajlati hatásai csak rendkívül lassan juthatnak érvényre. Következésképpen, a változások (jelenleg) alig belátható ideig elhúzódhatnak, sőt egyes feltételezések szerint irreverzibilis folyamatot is jelenthetnek.

A mezőgazdasági rendszerek „környezet-érzékenysége” miatt a hatásvizsgálatoknak akkor is nagy jelentősége van, ha - mint már korábban említettük - a tendenciájában egyirányú változások ténye nem vagy még sokáig nem kellő egyértelműséggel igazolható. Az akár csak az elmúlt két évtizedben tapasztalt éghajlati anomáliák és következményeik rámutattak arra, hogy a meteorológiai feltételek ingadozásaihoz való alkalmazkodás hatékonyságának növelése mindenképpen fontos feladat.

A mezőgazdasági hatásvizsgálatok céljaira is különböző módszereket alkalmaznak: múltbeli analógiákat többszörös statisztikai minták, esettanulmányok, eset-szenáriók formájában, növény-klíma modelleket stb. A legutóbbi időszak anomáliáinak, és társadalmi-gazdasági „válaszainak” tanulmányozása külön figyelmet érdemel, hiszen ezek segítségével az is vizsgálható, mennyire felkészült az adott társadalom a „külső” változások felismerésére, fogadására (Glantz, 1989; Dunay, Faragó és Nemes, 1988).

Az alkalmazkodás szempontjából az egyik legsúlyosabb feltételezés az éghajlati vízhiány növekedése, amit egyaránt elősegít a fokozódó párologtató képesség és a csökkenő csapadékmennyiség. Nyilvánvalóan az említett hatásokkal párhuzamosan viszont csökken(het) az öntözési célokra is hasznosítható vízkészlet. Növekszik tehát a növényállományok öntözővíz-szükséglete és emiatt az öntözési kapacitás ésszerűbb kihasználása és fejlesztése válhat szükségessé (Antal, 1986). A mezőgazdasági politikának ez is egy olyan tipikus területe, amely a meteorológiai feltételek jelenlegi ingadozása mellett is olyan döntésekre vezethet, amelyek hatások lehetnek a feltételezett éghajlatváltozáshoz való hatékony alkalmazkodáshoz. (De természetesen a két feltételrendszer részletesebb költség-haszon illetve rizikóelemzése már lényegesen eltérhet.) Ugyancsak az ésszerűbb mezőgazdasági vízgazdálkodást szolgálhatják bizonyos meliorációs eljárások.

Kanadai vizsgálatok szerint a fajtaválasztás lehet az egyik leghatásosabb eszköze a változó természeti feltételekhez való hatékony alkalmazkodásnak. Alapjaiban különböző éghajlati feltételek között, de a mi térségünkre is feltételezett változások (a felmelegedés mellett csökkenő csapadék, növekvő aszályhajlam) miatt pl. az őszi búzát nagyobb területen részesítenék előnyben a tavaszival szemben (Stewart et al., 1988). Az aszályok gyakoriságának és intenzitásának növekedésére kézenfekvő „válasz” a szárazságtűrő növényfajták arányának növelése és egyúttal a nagyobb nedvesséigényűek arányának csökkentése (Czelnai, 1980).

A növénytermesztés hatékonyságát nagymértékben befolyásolhatja a műtrágyázás. Az optimális mennyiségű (tovább összetételű és ütemezésű) műtrágyakezelés jelentékenyen függ a vízellátottságtól (Dávid, 1987). A növények tápanyaggazdálkodása emiatt is rendkívülien éghajlatfüggő folyamat.

Az említett tevékenységek egyrészt hatással vannak a térség agroökológiai potenciáljára (növelik azt), másrészt csökkentik a növénytermesztés érzékenységét az éghajlati kényszerekkel szemben (Czelnai, 1980). Ezek a „megelőzési stratégiák” típusába tartoznak és a tervezett (tudatos) alkalmazkodás eszközei. Az öntözés, a fajtaválasztás, a melioráció mellett - de azoktól nem függetlenül - ide sorolhatók azoknak a művelési módoknak a fejlesztése és terjesztése, amelyek „víztakarékosak”, környezetkímélők és egyben - egy tágabb szemléletben - közgazdaságilag is hatékony(abb)ak.

Az éghajlat ingadozásával és változásával összefüggő hatások nem egyszerűen csak egy-egy növényfaj terméshozamával vagy egy-egy társadalom mezőgazdaságának hatékonyságával kapcsolatban vizsgálhatók, hanem azoknak hatása lehet a világ élelmiszerhelyzetére, az élelmiszer világgereszkedelmére is. Ezt jól illusztrálták a közelmúlt gabonakereskedelmi eseményei illetve a gabona

árának változásai, és hasonlóképpen jelentékeny változások várhatók egy esetleges klímaváltozás következtében (Smit, 1989).

Az alkalmazkodóképesség nagymértékben függ a társadalmi-gazdasági fejlettség adott szintjétől és a változás ütemétől. Az alkalmazkodás - feltételezve, hogy a megelőzési tevékenység nem hatásos vagy nem kellő mértékű (pl. az „üvegház-gázok” kibocsátásának csökkentésével kapcsolatban) - általában célszerűbb, mint az esetleg belátható és bekövetkező káros (illetve a természetést akadályozó) jelenségek következményeinek mérséklése. A két megoldás közötti választást végső soron csak a rizikótényezőket is figyelembevevő „költség-veszteség” elemzések elvégzésével lehet megoldani.

### **3.4. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS FELTÉTELEZETT VÁLTOZÁSÁNAK HATÁSA AZ ERDŐÁLLOMÁNYOKRA, AZ ERDŐGAZDÁLKODÁSRA**

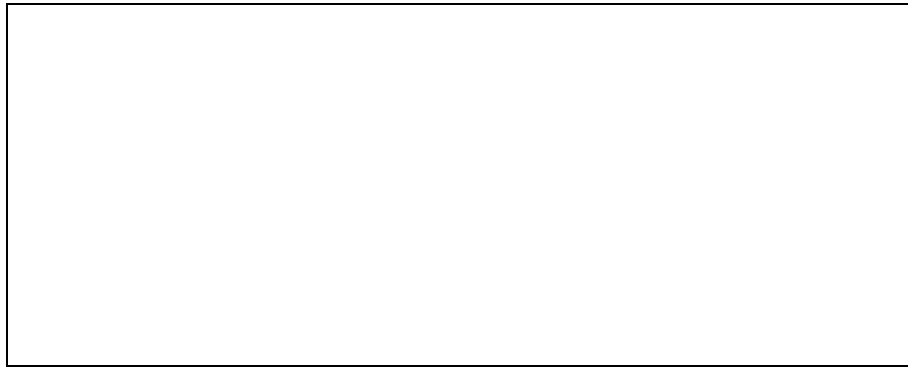
Az erdő az éghajlat esetleges megváltozása során hármas szerepet játszana az éghajlati rendszeren belül: mint a kölcsönhatás passzív oldala, amikor a hatások következményeként megváltozna az erdők összetétele és az erdőgazdálkodás; mint a kölcsönhatás aktív tényezője, visszahatna a klímára a felszín tulajdonságainak, a gázcsere folyamatoknak, a sugárzási áramoknak a megváltoztatásával; közvetve, mint a legfontosabb üvegház-gáz, a szén-dioxid egyik legalapvetőbb forrása a humán tevékenységen keresztül, mivel az erdők révén évente mintegy 2,5 milliárd t szén-dioxid jut a levegőbe.

A nemzetközi ajánlások a következő, erdővel kapcsolatos hatásvizsgálatokat tartalmazzák: az erdő és az éghajlat, mint erőforrások; biológiai reakció, alkalmazkodás és termelési potenciál; erdei tüzek, rovarkárok és betegségek; erdőművelés, erdők kezelése és infrastruktúra; becsült termelési zónák és szintek; regionális és globális termékellátás és kereskedelem; az erdészeti ipar társadalmi gazdaságtana.

A közepes földrajzi szélességek mentén található erdők a fákban, más növényekben és a talajban olyan szénmennyiséget tartalmaznak, amely nagyságrendjét tekintve összehasonlítható a légkörben jelenleg meglevő, kötött állapotú szén mennyiségével, ezért is fontos ezen területek reakciójának ismerete egy esetleges klímaváltozás esetén.

A közepes földrajzi szélességű területeken elterülő erdők lehetséges reagálásait az éghajlatváltozásra felmérték, figyelembe véve a magvándorlás mértékét, a hőmérséklet változásával együttjáró változásokat az erdő felújulási folyamatában és az álló fákat érintő klimatikus stresszhatást. Sok fafaj felújulásának sikeressége csökkenni fog a melegedéssel, és fokozódni fog mind a fák, mind az egyéb növények mortalitása. Ezek a változások először a fafaj elterjedési területének melegebb és szárazabb részein lesznek láthatók. Nincs olyan küszöbérték, amely alatt a hatások ne jelentkeznenek.

Az erdőkre gyakorolt erősebb hatások fellépésének kezdetét a 2000 körüli évekre becsülik, az erdőpusztulás 2000 és 2050 körüli elkezdődésével. A felmelegedés hatása az erdők területének és szénkészletének csökkenésében fog jelentkezni. Az erdők és a biomassza által elfoglalt terület változását szemlélteti a 12. ábra, amely a IIASA-ban végzett kutatások eredményeinek összefoglalásaként készült. Az ábrán a Holdridge-féle életzóna osztályozás alapján megkülönböztetett fő erdő- és biomassza típusok által elfoglalt területek százalékos változása látható a légköri széndioxid koncentráció megkétszereződése esetén (Emanuel et al., 1985). A változások nagysága a hőmérsékletváltozás mértékétől függ.



12. ábra A fő erdőtípusok elterjedésének változása szimulált éghajlati feltételek esetén

A hőmérséklet alakulására megjelölt alsó határérték esetében fajok eltűnése, a felújulás meghiúsulása és nagyarányú erdőpusztulás 2100 előtt nem fog bekövetkezni, bár a melegedés az erdő-sült régiókban bizonyos változásokat fog előidézni. Az alsó határérték szerinti hőmérsékletváltozás esetén az erdő-sült régiókban bekövetkező változások mértéke elég alacsony lesz ahhoz, hogy megközelítse azt a mértéket, amilyen mértékben az erdők a közelmúltban alkalmazkodtak az éghajlati változásokhoz.

Ezek a becslések illusztrálják a hőmérsékletváltozások mértékének jelentőségét az erdőkre gyakorolt hatások szempontjából. Ha a hőmérséklet változása gyors, a következmény a fák pusztulása lesz és a helyükbe lépő fák kisebb fakészletet fognak nyújtani. Ennek a trendnek a következményeként egyre több erdő esetében lesz szükség mesterséges erdő-sítésre (vagy kezelésre), hogy a területen produktív erdők legyenek fenntarthatók. Az ilyen munkaigényes beavatkozás gazdaságossági szempontból életképtelen lehet az előzőleg kezeletlen erdőkkel kapcsolatos gazdaságossághoz képest.

Az emberi tevékenység környezetszennyező hatása nemcsak a globális melegedésen keresztül, hanem közvetlenül is hat a növényekre. Egyrészt a levegő összetételének megváltozása károsíthatja a növényeket, másrészt ugyanezen ok miatt a növényzet másképpen válaszol a külső hatásokra, legyenek azok éghajlati, biológiaiak (pl. kártevők, betegségek), vagy más eredetűek. A szükséges hatásvizsgálatok kiindulópontja az, hogy az erdő egy olyan ökológiai rendszer, amelyben a klíma döntően meghatározza az erdő összetételét és közvetve az erdő szervesanyag termelését.

### **Az éghajlat és az erdő-társulás változása a múltban**

Az erdők fejlődéstörténetének vizsgálatában döntő jelentőségűek voltak Bertsek (1931), Fírbás (1935), hazai viszonyokra pedig Zólyomi (1952) pollenanalitikai vizsgálatai. Ennek alapján a hazai erdők fejlődéstörténete a következő:

- A Würm-III. jégkorszakban hazánkban hideg, száraz klíma uralkodott, a terület legnagyobb része löszpuszta volt, és kisebb-nagyobb Pinus erdő-foltok tarkították, különösen a dombvidéki területeken.

- A postglaciális időszakban 12-19 ezer évvel ezelőtt a lassú melegedés során a Pinus mellett a nyír is megjelent, mint erdő-alkotó. Ennek a korszaknak a második felében humidabb lett az éghajlat, az erdő zárult, és kialakultak a tajga jellegű Pinus nyírerdők.

- A melegedés folytatódásával Pinus és nyír elegyes erdők alakultak ki. Az erdők a tajga és az erdőssztyepp átmenetét képezték, a korszak végén már a tölgyek is megjelentek. Ez a korszak mintegy 10 ezer évvel ezelőtt fejeződött be.

- A további melegedés eredményeként a mogyoró és a tölgy erdőssztyepp jellegű állományokat alkotott. Ezt nevezik mogyorókornak. Ez a korszak még boreális jellegű. Mintegy 7 ezer évvel ezelőtt zárult.



- Ezután a hőmérséklet emelkedett, és az éghajlat humidabbá vált. Kevert tölgyesek, majd a végén bükkösök, gyertyános-tölgyesek alkottak zárt lombdőt, és megjelent a jegenyefenyő is. E korszak mintegy 4500 évvel ezelőtt fejeződött be.

- A további melegedéssel és humiditással az éghajlat a maihoz hasonlóvá vált. Bükkösök, gyertyánosok, tölgyesek alkották az erdőket. A jegenyefenyő nagyobb elegyarányban jelent meg. Ez a korszak mintegy 2800 évvel ezelőtt végződött.

- A mai időszak elején, már a történelmi időkben az éghajlat alig változott, az erdők összetételében a bükk aránya csökkent, növekedett a jegenyefenyő, az erdeifenyő és a luc aránya.

A közelmúlt erdőtörténeti változásait vizsgálta pollenanalitikai módszerrel Friedrich Krall (1989) a Rozália hegységben. Vizsgálatai szerint a késő középkortól máig jól kimutatható az éghajlatváltozás hatása és az erdőgazdálkodás befolyása. A bükkösök többé-kevésbé szinten maradása mellett a szárazabb klímahatásra a jegenyefenyő szinte teljesen visszaszorult. Érdekes a hárs és a tölgy jelentős csökkenése. Az erdőgazdálkodás eredményeként az erdeifenyő aránya megkétszereződött, és a lucfenyő aránya is két-háromszorosára nőtt.

A pollenanalízissel végzett vizsgálatok kiterjesztése, részletesebb időbeli, térbeli és mennyiségi meghatározások elvégzése (különösen az uralkodó fajokra, kiemelten klímajellemzőkre), lehetővé tenné az egyes fajok, illetve erdőtársulások elterjedésének és annak változásainak nagy időléptékű meghatározását, egybevetve azt az adott időszakon belül végbemenő klímafluktuációkkal. Ennek segítségével a jelenlegi areájukat az éghajlattal összefüggésben vizsgálva az éghajlatváltozás tendenciájára, illetve az összefüggés másik oldalát tekintve a fajok jövőbeli elterjedésére kaphatunk összefüggéseket.

## **Az időjárás és a főbb erdőalkotó fajok növekedése közötti összefüggés**

Az erdőt alkotó fajok elterjedése elsősorban az éghajlattól függ, növekedésük, szervesanyag termelésük közvetlenül és közvetve az időjárás függvénye. Hazai viszonyok között az erdő termelését a hasznosítható vízmennyiség határozza meg. Ez a vízmennyiség közvetlenül, illetve a talajon keresztül közvetve az éves csapadéktól függ.

Az erdő éves vízforgalma, vízfelhasználása alapján az év három szakaszra bontható. E szakaszok időjárásának jelentősége az egyes fajok szempontjából eltérő: az időjárás hatásának egyes kérdéseit Führer és Járó (1989) behatóan elemezte.

Az időjárás évi menetének és a fajok növekedése közötti összefüggések ismerete - témánk szempontjából - azért fontos, mert akár az éghajlat változékonysága, akár egy esetleges éghajlatváltozás jelentős hatással van (lehet) az éghajlati elemek éves menetére, az időjárási jelenségekre, a szélsőséges időjárású időszakok intenzitására, gyakoriságára - s ezáltal közvetve a fajok növekedésére. E kapcsolat, mint említettük, elsősorban a természetes vízellátottság alakulására vonatkozik.

Az éghajlati hatásvizsgálatok szempontjából különösen az évszűrés elemzése fontos. Az évszűrés szélességére a csapadék mennyiségén kívül számos egyéb tényező is hat, de az évszűrés analízis végsősoron - meghatározott körülmények között - jól mutatja az időjárás és az erdő növekedése közötti összefüggést. Az évszűrésanalízis és az időjárás közötti összefüggés vizsgálatánál természetesen a hőmérséklet hatásának értékelése is szükséges. Ebben az esetben az összefüggések az éghajlatváltozás tendenciájának, hatásának közelítésére is felhasználhatók.

## **Az éghajlat és az erdőtársulások elterjedése**

A természetes erdőtársulások elterjedését elsődlegesen az éghajlat határozza meg.

Az erdőt alkotó növény- és állati életközösség számára egy többé-kevésbé elhatárolható térben, biotópban az élettelen környezeti tényezők hozzák létre az életfeltételeket. A biotópban az erdőre ható ökológiai tényezők közül a legfontosabb az éghajlat, a hidrológiai viszonyok és a talaj, amelyeket összefoglalva termőhelyi tényezőknek nevezünk. Az ökológiai tényezők időben és térben állandóan változnak. A változáshoz az erdő, mint életközösség, megfelelő módon alkalmazkodik, és egyúttal hat a felsorolt ökológiai tényezőkre is. A természetes erdőben a környezeti tényezők és a növény- és

állattársulások között sokoldalú kölcsönhatás alakul ki, és egy kiegyensúlyozott rendszer - erdei ökoszisztéma - jön létre. A hazai természetes lomberdők az erdőgazdálkodás kezdete előtt olyan erdei ökoszisztémák voltak, amelyekben a szervesanyag-, víz- és tápanyagforgalom dinamikus egyensúlyban volt és a legkedvezőbb energiahasznosítással párosultak.

Az erdőtársulások, ezen belül az állományalkotó fajok az elmúlt, mintegy 3-5 ezer év alatt a számukra megfelelő éghajlati viszonyok között elterjedtek. Elterjedésük, illetve areájuk tehát szorosan kapcsolódik az éghajlati adottságokhoz, és az összefüggés lehetővé teszi az éghajlatváltozás hatásának értékelését. A hazai főbb állományalkotó fajok, illetve elegyfajok elterjedése, és rájuk a globális felmelegedés hatásai a következők.

- Jegenyefenyő. Közép-európai faj, hegyvidéken sok csapadékú, magas páratartalmú területeken őshonos, hazánkban csak a nyugati határszélen szálsként őshonos. A pollenanalízisek szerint feltételezhetően a szárazabb klímahatásra visszaszorulóban van. A visszaszorulásában döntő szerepet azonban az erdőgazdálkodás játszik. A klímaváltozás feltehetőleg csökkenését fogja okozni.

- Lucfenyő. Északi jellegű európai faj. Hazánkban csak a Nyugat-Dunántúlon őshonos, bükkal és jegenyefenyővel alkot egyes erdőtársulást. Hűvös, párás, csapadékos klímát kíván. Értékes fája miatt elterjedési területén kívül széles körben telepítik. A klímaváltozás hatására areája megváltozik, telepítése hazánkban is csökkenni fog.

- Feketefenyő. Mediterrán faj, a szélsőséges nyári szárazságot és a téli fagyot is jól viseli. Szárazságtűrőse miatt hazánkban széles körben telepítették a kopárokon és a Duna-Tisza-közi homokon. A klímaváltozás elterjedési területét, különösen az areájának az északi határán növelni fogja, hazánk erdőtelepítésében jelentősége növekedni fog.

- Ezüst hárs. Melegkedvelő, síkságokon, dombvidékeken alkot ezüst hársas-cseres tölgyeseket, de a bükkösöknek, gyertyános- tölgyeseknek is elegyfaja. Hazánkban éri el elterjedésének északi határát, a kontinentális alföldről hiányzik. A hársak közül a legszárazságtűrőbb és a légszennyezést is jól elviseli. A klímaváltozás elterjedését észak felé növeli. Hazánk fafajpolitikájában, mint értékes elegyfaj a jelenleginél nagyobb szerepet kap.

- Világos kőris. Szubmediterrán faj. Hegyvidéken a karszterdőknek egyik típusjellemzője. Hazánkban éri el elterjedésének északi határát. Melegkedvelő, fényigényes, szárazságtűrő. Karsztbokor erdeinkben a molyhos tölgyeinkkel együtt alkot erdőtársulást. Erdőgazdálkodásunkban nincs jelentős szerepe, a kopárfásításban és a karszterdők talajvédelmében kismértékben alkalmazzák. A klímaváltozás elterjedési területét észak felé növelni fogja, és hazánk erdőtelepítésében szerepet fog kapni.

- Gyertyán. Közép- és délkelet-európai faj. Melegkedvelő, párás, csapadékos klímát kíván. Jellegzetes árnytűrő elegyfaj. Hazai legértékesebb bükkös és tölgyes erdőtársulások elegyfaja. Mint elegyfaj erdőgazdasági jelentősége nagy, szerepe előnyös a fő faj növekedésére és a termőhely termőképességének fenntartására. A klímaváltozás elterjedési területét megváltoztatja. Hazánk területén vissza fog szorulni, és a gyertyános-tölgyesek területe csökkenni fog.

- Bükk. Közép-európai szubatlanti faj. Meleg, párás, csapadékos klímát kíván. Hazánk egyik legértékesebb erdőtársulása, amelyik a domb- és hegyvidéken természetközeli állományokat alkot. A bükkös ökológiailag és ökonómiailag is a magyar erdőgazdaság legjelentősebb faállománya. A klímaváltozás elterjedési területét megváltoztatja. Hazánkban a bükkösök aránya csökkenni fog és a megmaradók felújítása is kedvezőtlenül változik.

- Szelidgesztenye. Mediterrán faj. Őshonos elterjedési határa a Kárpát medencében található. Hazánkban feltételezett őshonos állományai a Nyugat-Dunántúlon, Zalaiban, Somogyban és Baranyában találhatók. Párás, meleg klímát kíván, a szélsőséges szárazságot és a fagyokat nem tűri. A hazai gyertyános tölgyesek elegyfaja, de gyümölcsstermesztés céljára széles körben telepítik. A klímaváltozás elterjedési területét észak felé növeli, de areáján belül telepíthetősége a páraigénye miatt csökkenhet.

- Kocsányos tölgy. Európai faj. Az éghajlati szélsőségeket a nyári hőséget és a téli hideget egyaránt jól bírja, ha termőhelyének vízellátása megfelelő. Alföldjeinken az erdőssztyepp klímában csak a közeli talajvízű termőhelyeken alkot erdőt. Az ún. pusztai tölgyeseknek és a síkvidéki gyertyános-tölgyeseknek fő faja. A magyar erdőgazdálkodásban a kocsánytalan tölgy mellett a legjelentősebb

nemestölgyünk. A klímaváltozás elterjedési területét nem érinti. Ha a klímaváltozás csapadék-csökkenéssel jár együtt, és ez közvetve a talajvízszint süllyedését is okozza, akkor a kocsányos tölgyesek elterjedése csökkenni fog és a növekedésük is visszaesik.

- Kocsánytalan tölgy. Közép európai szubmediterrán, szubatlanti fafaj. Az éghajlati szélsőségeket nem bírja, meleg és páraigényes. A magyar erdőgazdálkodásban a legfontosabb tölgyfaj. Legnagyobb elterjedésű és legértékesebb fajunk. Klímaigény szerint a kocsánytalan tölgy három alfaját különítik el. A klímaváltozás szempontjából kívánatos lenne az alfajok konkrét klímaigényét meghatározni. A klímaváltozás elterjedési területének eltolódását, megváltozását okozhatja. Ha a klímaváltozás páratartalom-csökkenéssel jár, akkor a hazai területaránya is csökken és felújítási lehetőségei is romlanak. A csapadékcsökkenés esetén a növekedése is gyengül.

- Molyhos tölgy. Mediterrán, Közép-európai fafaj. Hazánkban éri el elterjedési területének északi határát. A legkisebb területarányú tölgyfajunk. Erdőgazdasági jelentősége kicsi. A talajvédelmi erdőkben és a kopárfásításokban az eddigénél nagyobb szerepet kell juttatni számára. A klímaváltozás elterjedési területének feltételezetten északra tolódását okozhatja. A száraz, meleg termőhelyeken jelentősége nőni fog.

- Csertölgy. Keletmediterrán fafaj. A kontinentális klímát nem bírja, különösen a kései fagyok károsítják. Hazánkban éri el elterjedési területének északi határát. Egyik legelterjedtebb tölgyfajunk. Természetes elterjedési területén kívül széles körben ültették. Szárazságtűrőse, jól felújíthatósága és főleg kiváló tűzifája miatt az 1950-es évekig széles körben termesztették a nemesebb fajok rovására. A fafajpolitikai irányelvek szerint jelenlegi arányát lényegesen csökkenteni kívánják. A klímaváltozás elterjedési területét észak felé növelheti. A fafajpolitikai irányelveket klímaváltozás esetén olyképp kívánatos módosítani, hogy a cseresek területe ne változzon.

Ezt a vizsgálatot az összes, hazánkban található, és az esetlegesen a feltételek megváltozása után ide betelepíthető fajokra érdemes elvégezni, hogy aztán a fafajpolitikában figyelembe lehessen venni, annál is inkább, mivel ilyen értékelésre az eszközök rendelkezésre állnak (Walter-diagram).

#### Erdészeti klímaosztályozás

A hazai fő állományalkotó fajok termőhelyigényének feltárása, valamint areájuk értékelése alapján sajátosan magyar termőhely értékelés készült. Ebben az értékelésben döntő szerepe van az éghajlati viszonyoknak. A kutatás során feldolgozva 62 meteorológiai állomás adatait, és egybevetve ezek erdőtársulásával, megállapítható volt, hogy az erdőtársulásoknak legszorosabb kapcsolata a légnedvességgel van, és azok csak lazán függnek össze a hőmérséklettel és a csapadékviszonyokkal. (A légnedvesség július 14 órai átlaga bizonyult legalkalmasabbnak a termőhely klímátényezőjének jellemzésére.) Ezen felismerés alapján közvetett módon fafajokkal, ill. erdőtársulásokkal határozhatók meg egy erdőrésztlet ill. termelési egység klímaviszonyai. Führer és Járó (1989) részletesen bemutatja és jellemzi a hazai erdészeti klímatípusokat: a bükkös, gyertyános-tölgyes, kocsánytalan tölgyes illetve cseres és az erdőssztyepp klímát. Az egyes klímaosztályokhoz általános ökológiai, technológiai és ökonómiai feltételek is kapcsolódnak. A nagyobb légnedvességű területeken élnek a természetes, nagy stabilitású bükkös és gyertyános-tölgyes ökoszisztémák. A kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímájú területek az erdő számára már csak közepes adottságokat képviselnek. Az erdőssztyepp klímájú területen a természetes erdők már csak az ártereken, a közeli talajvízű termőhelyeken alakulhattak ki.

A klímatípusok ismerete alapvető jelentőségű a további vizsgálatok számára, hiszen az éghajlatváltozás egyben a globális klímaövek és a regionális klímatípusok eltolódását, módosulását is eredményez(het)i - és ezek következtében az egyes fafajták termőhelyeinek változását. Ennek következménye lehet az erdőgazdasági technológiák módosulása, illetve az erdők ökonómiai értékeinek változása is.

Az erdőgazdasági technológiák is szorosan kapcsolódnak a klímaosztályokhoz. A bükkösöket teljes mértékben, a gyertyános-tölgyeseket nagyrészt természetesen, magról az eredeti populációkat megtartva újítják fel. A kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímájú erdők felújítása csemetével mesterséges úton történik. Az erdőssztyepp klímájú erdők mesterséges felújítási kultúrerdők, amelyek megtartása fokozott beavatkozásokat igényel.

A különböző típusú erdők ökonómiai értéke is eltérő. A legértékesebb bükkösök és gyertyános tölgyesek fahozama (növedéke) kedvező, ökonómiailag a legjobb. A kocsánytalan tölgyes, ill. cseres

klímájú területek fahozama általában közepes és a termesztési költség jelentős, ökonómiailag közepes, vagy gyenge értékűek. Az erdőssztyepp klímájú erdők költségigénye nagy, a fahozam a termőhelytől függően változó, az ökonómiai érték a fahozamtól függően gyakran gyenge.

## **Fafajmegválasztás, fafajpolitika**

Az erdőgazdasági tájak kialakítása, a tájak rendszeres ökológiai és erdőművelési feltárása és a fontosabb fafajok folyamatos termőhelyigény vizsgálata - valamennyiben döntő szerepet kapott a jelenlegi éghajlat értékelése - megalapozta a táji fafajajánlás kidolgozását. 1970 óta a termőhelytípus változatokra épített „Az egyes termőhelytípusokon alkalmazható célállományok és azok várható növekedése” kötelező irányelv, amely ökológiai alapon a fafajmegválasztást és döntően a fafajpolitikát is meghatározza. Az országos agroökológiai potenciál felmérése is erre az irányelvre épült és a 2000. évre prognosztizált fafajmegoszlás is az ökológiai adottságokat vette figyelembe. A hazánkat érintő regionális klímaváltozás természetesen a távlati fafajpolitikát (a prognózist) is befolyásolni fogja. Az éghajlatváltozástól függően a magyarországi természetesen erdőtársulások-fafajok területaránya, a termesztési technológiák eredményessége és a fatermesztés természetes hozama, valamint gazdaságossága változni fog. Ez folyamatosan, elsősorban az erdőfelújításokban, erdőtelepítésekben és a hektárankénti növekedésképzésben fog érvényesülni. Természetesen az éghajlatváltozás okozta változásokat az antropogén-erdőgazdálkodási hatások kedvező vagy kedvezőtlen irányba befolyásolhatják. Kíváncsú, hogy az 1978. évi ökológiai alapon elkészített fafajmegoszlási feldolgozást kövesse egy 1988. évi hasonló szintű, mert ezzel a 10 évi változást és a jelenlegi helyzetet, mint kiindulást lehetne megalapozni. A regionális éghajlatváltozás hatását vizsgálva a különböző éghajlati típusok esetében külön kutatások határozhatják meg az adott típus szerepét az erdészeti klímátípusok elterjedésében, időbeli változásában, az erdők szervesanyag hozamának növekedésére. Az összes fatermesztés-változás előrejelzése szükséges az erdőgazdasági politika távlatának kialakítása érdekében.

## **A szénkörforgalom és az erdő kapcsolata**

Az üvegházhatást kiváltó szén-dioxid feldúsulás fő forrása a fosszilis energiahordozók elégetése. Évente így kb. 5,6 milliárd tonna szén jut a levegőbe, ami a Föld szénkörforgalmának egyensúlyát befolyásolja. A szén-dioxid kibocsátás másik nagy forrása az erdőirtások, főleg a trópusokon. Az erdőkitermelések révén a becslések szerint mintegy 2,5 milliárd tonna szén kerül a légkörbe, ami a Föld szénkörforgalmát tovább rontja, és az üvegházhatást folyamatosan növeli.

Hazánkban is szükséges az erdők szénlekötési folyamatának feltárása. Ez a feladat három témakörre tagolódik: meg kell határozni a hazai erdők élőfa készletét és az ebbe épült szénmennyiséget (az össz élőfa készlet meghatározása a főbb állománytípusok élőfa készlet meghatározására épül); a fő állományalkotó fafajok éves szénforgalmát optimális termőhelyükön vizsgálni kell a faállományba beépülő (növedék) és az éves forgalomba kerülő (avar) szervesanyag, ill. szén összefüggésében; meg kell határozni azon faállománytípusokat, amelyek a tartós szénlekötés és az erdőgazdálkodás szempontjából egyaránt optimálisak.

A szénlekötésben, a környezetünk kedvező alakításában és az erdőgazdálkodásban egyaránt kiemelkedő szerepe van az erdőtelepítéseknek és a szerkezetátalakításos erdőfelújításoknak. A kormányprogram szerint az ezredfordulóig mintegy 150 ezer ha új erdő telepítését tervezik. A magyarországi erdők szénlekötési folyamatának feltárására épülve a regionális éghajlatváltozás modellje szerint e feladat megoldásánál tekintettel kell lenni: a szénlekötést figyelembe vevő termőhely szerinti fafajmegválasztási irányelveket; a szénlekötést növelő szerkezetátalakítási (fafajcsere) irányelveket; a szénlekötést is figyelembe vevő hazai közép- és hosszú távú fafajpolitikai irányelveket.

Az erdő tehát a lehetséges éghajlati változások során jelentős szerepet játszik mint az éghajlati rendszer eleme, mint a változások egyik elszennvedője és mint jelentős szénrezervoár. Az emberi tevékenység környezetszennyező hatásai több szinten érintik az erdőt: a szennyező anyagok közvetlenül fejtik ki káros hatásukat, a növények reakciója megváltozik a külső feltételek módosulása esetén, az éghajlati feltételek változhatnak. Gyors változásra (és alkalmazkodásra) az erdők nem képesek, ezért fokozottabban kell az erdőgazdálkodási lehetőségeket és terveket koordinálni. Az erdő olyan ökológiai rendszer, amelybe a klíma döntően meghatározza az erdő összetételét és közvetve az erdő szervesanyag produkcióját. Így szükség van az erdő-éghajlat kölcsönhatás ismeretére. Ehhez jó módszer régebbi időszakra a pollenanalízis, az utóbbi 100-200 évre az évgűrű analízise, amely utóbbi vizsgálatot célszerű fajtánként és termőhelyenként elvégezni. A fafajoknak az éghajlattal szemben támasztott különböző igényei miatt erdőtársulás-változással számolhatunk, amelyet fajtánkénti részletes klímaértékeléssel előrejelezhetővé tehetünk, legalábbis szcenárió jelleggel. A különböző éghajlati hatások változásának tanulmányozása az erdőtársulások összetételére, térbeli változásaira, a szervesanyag termelésre enged következtetni. Az erdőknek az üvegházhatásban játszott jelentős szerepük miatt vizsgálni kell az erdő és a szénkőrforgalom kapcsolatát.

### 3.5. ENERGIA ÉS KLÍMA

Az energiatermelés várható jövőbeli alakulásának vizsgálata kapcsán számos kérdés merül fel: Milyen lesz az energia-igény a jövőben? Az igények hányad részét elégítik majd ki a különböző energiaforrások, energiafajták? Milyen környezeti hatásai vannak az energia-igény és felhasználás különböző fajtáinak? Az éghajlat ingadozása és esetleges változása hogyan befolyásolja az energiaigények alakulását?

Az emberi tevékenység meghatározó eleme (színtere) a természeti környezet. Ennek része az éghajlat, amelyhez az ember változatos módon alkalmazkodik - többek között - fűtéssel, hűtéssel, az ehhez illetve a különböző társadalmi-gazdasági tevékenységekhez a szükséges energiamennyiséget pedig részben az éghajlat határozza meg. Ugyanakkor a növekvő népesség igényeinek kielégítésére fokozódó energiatermelés, a nagy energiaigényű gazdasági ágazatok, egyes termelő tevékenységek, vagy akár a lakossági energiafogyasztás „melléktermékei” viszont hatással vannak a légkörre, az éghajlatra. A változó éghajlati feltételek pedig ismét visszahatnak például az energiaigényekre. Ezzel kapcsolatban az egyik alapvető kérdés, hogy az energiatermelés és fogyasztás, különösen pedig a fosszilis tüzelőanyagok alkalmazása előidézheti-e (elősegítheti-e) a levegőkörnyezet globális állapotának alapvető (esetleg visszafordíthatatlan) megváltozását. Emellett, más hatásokhoz hasonlóan, fel kell mérni az esetleges éghajlatváltozásnak az energiaszektorra gyakorolt várható hatásait is.

A világ energia-jövője a 70-es évek óta nemzetközi szinten és nemzeti keretekben is kiemelt kutatási, gazdaságprognosztikai téma. Ez részben az „olajár-robbanással”, részben azzal az erősödő felismeréssel áll összefüggésben, hogy az ismert és jelenleg intenzíven hasznosított földi-természeti erőforrások (nemcsak „potenciálisan”, hanem nagyon is valóságosan) végesek. A vizsgálatok kiterjedtek az összes alapvető természeti erőforrásra és az azokhoz kapcsolódó társadalmi-gazdasági problémákra. Megkülönböztetett figyelmet kapott már a „korai” időszakban (az élelmiszertermelés és -ellátás mellett) az „energia”. Jelenleg az Éghajlati Világprogram és a nemrég alakult IPCC tevékenységének keretében is a klíma-energia kapcsolat fontos szerepet játszik. Egyaránt vizsgálják az energiatermelés „melléktermékeként” a légkörbe kerülő üvegházgázok hatásait, valamint az esetleges éghajlatváltozás következményeit az energiatermelésre és az energiaigényekre.

#### Éghajlati hatások

Az időjárási/éghajlati fluktuációk közvetlenül vagy közvetve hatnak az energiaszektor különböző összetevőire, az energiahordozók feltárására, kitermelésére, szállítására, az energiatermelésre, tárolásra, fogyasztásra (Denness, 1984; WMO, 1986; Tárkányi és Ambrózy, 1984; Ambrózy és Faragó, 1988).

A 70-es években, 80-as évek elején széleskörű kutatások kezdődtek a világ energia-jövőjére vonatkozóan is (Bach et al., 1980). A klíma-energia kapcsolat témakörében a IIASA külön projektet indított (Flohn, 1980; Häfele, 1981; Jäger, 1983). E programok keretében egyrészt az energiarendszerek olyan környezeti hatásait vizsgálták, mint a légköri kibocsátások, a hőszennyezés, másrészt pedig a rendszerek klímafüggése volt a kutatások tárgya.

Az energiarendszerek, az energiafogyasztás néhány területe jelentékeny érzékenységet mutat az időjárás és az éghajlat változásaira. A meteorológiai tényezők ingadozásai többek között együttjárnak illetve befolyásol(hat)ják a következő, az energiagazdálkodással összefüggő természeti erőforrásokat és emberi tevékenységeket: a megújuló légköri energiaforrások jellemzőit, a vízienergia-potenciált, a kommunális (elsősorban a fűtési és hűtési) energiaigényt és fogyasztást, az energetikai, energiaszállító rendszerek (tervezését és) működését. A rendszerek hatékonyságának esetleges változásai mellett, a szélsőséges meteorológiai jelenségek, például extrém szelek (széllökések), nagy csapadékintenzitás, jég, alacsony hőmérsékletek károsíthatják, működésképtelenné tehetik a rendszereket. A negatív időjárási, éghajlati hatások megelőzhetők, a hatások mérsékelhetők, de ez a biztonságos üzemeltetés és a ráfordított költségek optimális arányának mérlegelését, kialakítását igényli. Ez az igény motiválta az időjárási elemek, a

szélsőséges meteorológiai események, az éghajlat ingadozását és esetleges változását leíró meteorológiai tényezők és az energiagazdálkodás összefüggéseinek vizsgálatát. Az energiafogyasztás leginkább éghajlat-függő területe hazánkban a fűtési energiafelhasználás. Emellett számos ipari, mezőgazdasági tevékenység energiaigényét is kisebb vagy nagyobb részben befolyásolják a meteorológiai elemek változásai. Az energetikai rendszerek tervezése és működése szempontjából kiemelkedő fontosságúak a „csúcsterhelés” időszakai; az éghajlatingadozásokat kísérő, a szélsőséges hőmérsékleti értékek gyakoriságában is jelentkező változásoknak emiatt lényeges szerepe van az éghajlat energiagazdálkodási hatáselemzésében. Az éghajlati hatások sajátosan érvényesülnek ott, ahol a „kommunális” hűtési energiaigény legalább olyan nagyságrendű, mint a fűtési; a feltételezett globális felmelegedés fogyasztói energiaigény-mérlege tehát korántsem magától értetődően kedvező (Linder, 1989). Egyes becslések szerint, összességében az energiaigény a légköri szén-dioxid megkétszereződésével (is) kiváltott éghajlatváltozás akár 15-25%-os energiatermelő kapacitásnövelést is szükségessé tehet a mérsékelt égövben fekvő országokban.

### **Az energiatermelés és fogyasztás hatása a levegőkörnyezetre és az éghajlatra**

Az energiatermelés és fogyasztás alapvetően az alábbi három módon befolyásolhatja a levegőkörnyezetet és az éghajlatot: megváltoztatja a földfelszín sajátosságait; a hulladékhő légköri kibocsátása következtében a levegő energiatöbbletéhez jut; a légkörbe kerülő szennyezőanyagok megváltoztatják a levegő összetételét, az alkotórészek koncentrációját és emiatt többek között módosulnak a légkör sugárzásátviteli tulajdonságai. E hatásokat részletesen vizsgálják már a 70-es évektől (Bach et al., 1980; Jäger, 1983).

Az energiagazdálkodás jövőjének kérdéseit persze nem lehet leszűkíteni a társadalmi-gazdasági igények változásainak, vagy például a levegőkörnyezetre gyakorolt hatásoknak a problémáira. Az energiatermelés jövőjének alapvető kérdése a nem megújuló energiaforrások végeessége, ami napjainkra a „potenciális” korlátból nagyon is valós tényezővé vált. Ez a „tartós fejlődés” koncepciójának és programjának egyik alaptémája is (Brundtland, 1988; Kristoferson, 1988).

A földfelszín jellegének megváltozása a felszíni albedón és a felszín energia-mérlegén keresztül befolyásolhatja vagy módosíthatja az éghajlatot. Vízierőművek mesterséges víztározói a hidrológiai ciklusba regionális méretekben is beavatkozhatnak. Főleg a fejlődő országokban olyan méreteket ölt az erdőirtás, hogy a felszín ily módon történő átalakítása valószínűen nem elhanyagolható hatású. A napenergia nagymérvű átalakítására alkalmas heliosztátok, amelyek hatalmas területeknek magas tornyokkal való betelepítését jelentik, közvetve módosíthatnak cirkulációs folyamatokat is. Tovább a néhány millió km<sup>2</sup>-nyi terület átalakítása döntően megváltoztathatja a terület hő- és vízháztartását.

A légkör hőszennyezésével kapcsolatos vizsgálatok azt mutatták, hogy az emberi tevékenység következtében a légkörbe kerülő hő teljes mennyisége egy századrésze a földfelszín által elnyelt napenergiának. Egészen szélsőséges lehetőségként 20 milliárd emberrel és 20 kW/fő felhasználással számolva a felszabaduló hő a napenergiának fél százalékát tenné ki és a felszín 1°C fokkal történő felmelegedéséhez vezetne globális méretekben, ami a poláris vidéken felnagyítva jelentkezne. A „hőforrások” azonban nem egyenletesen oszlanak el a felszínen; a koncentrált hőszennyezés hatása azonban már igen jelentős lehet nagyoobb léptékű éghajlati folyamatokra is. Egyes becslések szerint 100-300 TW az az energiamennyiség, amely az elmúlt századok természetes éghajlatváltozásait létrehozhatta. Azonos nagyságrendű „perturbáció” kell tehát ahhoz is, hogy az emberiség is éghajlatváltozást idézhessen elő. Az egyenként kb. 3000 MW-os hőerőművek hatása éghajlati szempontból nem okoz problémát, de elképzelhető, hogy 10-50 ezer MW-os erőművek hődisszipációja helyileg megnövelheti a felhőzetet és a csapadékot; tovább kellemetlen időjárási események elindítója lehet, legalábbis a mérsékelt szélességeken. A nagykapacitású erőművekből származó hulladékhő, valamint a légkörben felgyülemlett szennyezőanyagok (széndioxid, aeroszolok) hatása a globális éghajlatra különböző típusú numerikus modellekkel tanulmányozható.

Valószínűnek látszik, hogy a hőszennyezés és a felszínmódosítás egyelőre csak lokális illetve regionális léptékben okoz éghajlatmódosulást. Ezzel szemben az energiatermeléssel és fogyasztással járó légköri kibocsátások globális méretekben idézhetik elő a globális éghajlati kép változását. A szén-dioxid-kibocsátás mellett más nyomgázoknak - különböző ipari, mezőgazdasági, energiatermelési és -fogyasztási tevékenységek „melléktermékeként” - a légkörbe kerülése idézheti elő a légkör összetételének és közvetve az éghajlat módosulásának globális és esetleg visszafordíthatatlan folyamatát. Annak érzékeltetésére, hogy e probléma súlyosságának felismerése viszonylag mennyire újkeletű, Landsbergtől (1979) idézünk: „1860 óta a légköri szén-dioxid körülbelül 10 %-kal nőtt, 290 ppm-ről 320 ppm-re. Durva modell-becslések alapján ez 0,2°C fok hőmérséktemelkedést jelentene. Egy ilyen mértékű növekedés nyilvánvalóan 'eltűnne' a nagymértékű természetes fluktuációkhoz képest. Ugyanakkor, a fosszilis tüzelőanyagok egyre gyorsuló ütemű alkalmazása esetleg egy jelentős globális felmelegedést idézhet elő, hacsak más tényezők nem játszanak közre az éghajlati energiámérlegben.”

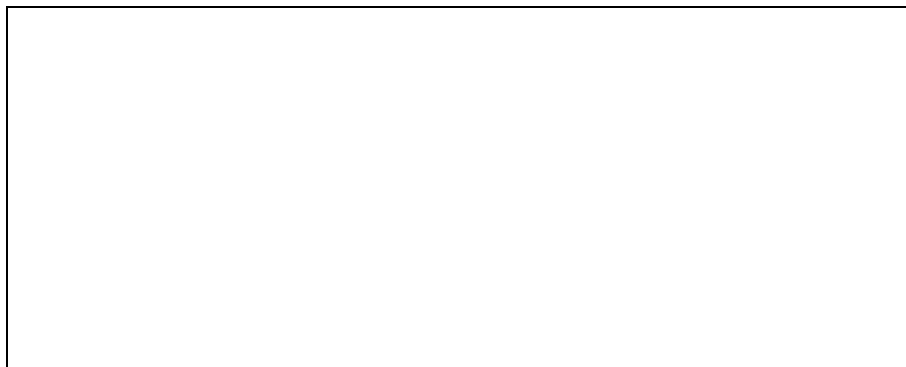
Az emberi tevékenység közvetítésével a légkörbe kerülő „üvegház-gázok” hatása - mennyiségük és sugárzási tulajdonságaik miatt - különböző. Becslések szerint e hatás fokozódásában szerepük rendre a következő: szén-dioxid 49%, metán 18%, CFC-k együttesen 14%, nitrogén-oxidok 6%, további nyomgázok (pl. sztratoszférikus ózon) 13%.

A klímamódosítás globális jellegének és az „egymásrautaltság” tényének érzékeltetésére célszerű bemutatni azokat a becsléseket, amelyek szerint az üvegház-gázok kibocsátása térségenként - a lakosság, a technológiai fejlettség, az energiagazdálkodás hatékonyságának függvényében - rendkívül eltérő; nevezetesen: USA 21%, Szovjetunió 14%, Nyugat-Európa (pontosabban az EGK-államok) 14%, Kína 7%, Brazília 4%, India 4%.

Az energiatermeléssel (a fosszilis tüzelőanyagok elégetésével) nemcsak az üvegház-hatást fokozó gázok kibocsátása nő, hanem a levegő és a csapadékvíz savasságát módosító kén- és nitrogén-oxidoké is (Mészáros, Major és Horváth, 1984).

Felismerve az emberi tevékenység, s ezen belül egyes felszínátalakító, mezőgazdasági, ipari és energetikai tevékenységek „nem szándékos” környezeti következményeit, az utóbbi években a kutatások, a nemzetközi együttműködés e témakörben rendkívül intenzívvé vált. Megkezdődött az ózonréteget lebontó gázok kibocsátásának drasztikus csökkentése (a „Montreáli Jegyzőkönyv” értelmében); egyes államok e kibocsátások még gyorsabb és nagyobb mértékű csökkentésének szükségességét is felvetették. E folyamat - „mellesleg” - igen fontos az antropogén klímaváltozást kiváltó okok megszüntetésének szempontjából is (lévén a CFC-k egyben nagyon hatékony üvegház-gázok is). A klímaváltozásra vonatkozó becslések minden bizonytalansága ellenére az USA törvényhozása már a széndioxid-kibocsátások fokozatos csökkentését is tervezi: 20%-kal az ezredfordulóig, 50%-kal 2015-re. E lépés azonban nagyon költséges a mai technológiai lehetőségek ismeretében. Pedig a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának csökkentése jelentősen csökkentené a széndioxid emissziót. A 2050-ben várható energia-igényt és a széndioxid emissziót tünteti fel a 13. ábra a technológiai javítások illetve változatlan technológia esetén. Az ábra jól szemlélteti, hogy a technológiai feltételek javításával milyen nagy mértékben csökkenthető a légkörbe jutó széndioxid mennyisége. A kibocsátások csökkentése emellett csak hosszú idő múltán éreztetné hatását. A széndioxid-kibocsátás említett 20%-os csökkentését - ajánlatként - az 1988-as torontói konferencia is elfogadta („Világkonferencia a Változó Légkörről”). Az energiaszektor mellett más antropogén hatások (pl. a trópusi erdők irtása) is lényeges. Jelenleg a WMO és a UNEP már egy átfogó nemzetközi megállapodás megfogalmazását és elfogadását is ajánlja „Konvenció az Éghajlatváltozásról” címmel.





13. ábra Várható globális energia igény és szén-dioxid emisszió 2050-ben a tüzelőanyag típusok függvényében, technológiai javítás illetve változás nélküli esetekben

Az energiagazdálkodási hatástanulmányok, kutatások egyik alapvető célja annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy szükséges-e környezetvédelmi okokból a jelenlegi energiapolitika módosítása. A gazdaság más területeihez hasonlóan az energia-szektor esetében is a lehetséges jövőbeli állapotok, a scenáriók képezik a hatástanulmányok alapját. Az energia-igény várható jövőbeli alakulásának becsléséhez fel kell mérni számos tényező jövőbeli állapotában bekövetkező változásokat is. Ezek a következők: lakosság, népesség; gazdasági növekedés és szerkezet; települések (városok) elhelyezkedése és szerkezete; szállítás és közlekedés; elsődleges energiafajták átalakítása; környezetellenőrzés- és védelem.

Az e problémakörrel kapcsolatos vizsgálatok a 70-es években és a 80-as évek elején - mint említettük - intenzíven folytak a IIASA-ban. A Wisconsin egyetem által kifejlesztett, majd a IIASA által kiterjesztett regionális energia-környezet rendszer szimulációs modellje az alábbi szubmodellekből áll: társadalmi-gazdasági modell; energia-igény modell; energia-ellátás modell; környezeti modell. A szubmodellek egymással is kapcsolatban állnak. A vizsgálatok keretében elkészült a Föld globális energia-igényének és ellátásának felmérése, valamint hasonló vizsgálatokat végeztek Európa kisebb régióira is. Ezenkívül energia-scenáriókat készített például a Nemzetközi Energiaügynökség (Párizs), az Energiakutató Intézet (IEA, Oak Ridge, USA), a Massachusettsi Műszaki Intézet (Boston, USA). Valamennyi scenárió egy 20 és 40 TW közötti folytonos energiaigény-növekedést tételezett fel 2030-ig. Ennek fő oka a népesség növekedése, valamint a fejlett és a fejlődő országok közötti energiafogyasztás egyenlőtlenségének csökkenése. Míg 1980-ban a teljes energiaellátást 90%-ban a fosszilis tüzelőanyagok fedezték, addig a IIASA magas és alacsony scenáriói 2030-ra mindössze 65-70%-os részesedést becsültek. Az energia-scenáriókkal kapcsolatos vizsgálatok alapján több stratégia képzelhető el: megengedni a fosszilis tüzelőanyagok használatát és így a CO<sub>2</sub> emissziót, folytatva a 4,3%/év növekedési arányt; mérséklődő ütemben megengedni a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának növekedését; a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó kibocsátást a jelenlegi szinten tartani; csökkenteni a kibocsátást. Napjainkban azonban a világgazdaság erősen függ a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásától, ezért jelenleg csak az a cél tűzhető ki reálisan, hogy a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása a jelenlegi szintet a továbbiakban se haladja meg. Ennek érdekében célszerű elősegíteni az energia hatékonyabb felhasználását, tárolását, szállítását; biztosítani azoknak az energiaforrásoknak a fejlesztését, amelyek felhasználásánál nincs vagy kismértékű a szén-dioxid-emisszió.

### **Középtávú energiapolitika hazánkban és annak környezeti, környezetvédelmi szempontjai**

A hazai energiapolitika főbb gazdasági és környezeti vetületeit vizsgálta Jászai (1989); főbb megállapításait foglaljuk össze az alábbiakban.

A magyarországi energiapolitika meghatározó tényezője a makro-gazdasági helyzet; ennek megfelelően az ipar energiaigénye nem növekedhet a közeljövőben. Az ipari szektor energiaszükségletét meghatározó tényezők becslése azonban igen bizonytalan a következő okok miatt: nem létezik megbízható előrejelzés arra vonatkozóan, hogy az elkövetkező időszakban milyen lesz a gazdasági fejlődés üteme, mikor kezdődik majd el a gazdasági fellendülés; különösen nehéz prognosztizálni a piac által befolyásolt „kényszerek” hatásait. A nem-termesztív szektor legfőbb fogyasztói a háztartások. Ezeknek - az energiagazdálkodást is érintő - változásaira lehet számítani, nevezetesen: a lakások száma a jövőben lassabban fog nőni; a speciálisabb kommunális energiaigények fognak növekedni. Az energiaigény csökkenthető a hatékonyabb háztartási gépek és az energiatakarékos eszközök elterjedésével, az épületek jobb hőszigetelésével, a megújuló (léghő) energiaforrások hatékonyabb (elsősorban passzív) alkalmazásával. Mindezek figyelembevételével a háztartási és a kommunális szektor évenkénti villamosenergia-igényének növekedése várhatóan az utóbbi 10 év 6 %-os értékéről 2,5-3 %-ra esik vissza; ugyanakkor az ipari szektor esetében ez 2,59 %-ról 1,2-1,4 %-ra csökken évente. Következésképpen a közép-távú elektromos energiafogyasztás 1,5-2,0 %-kal növekedni fog évente. Mivel a fosszilis tüzelőanyagok közvetlen felhasználásában jelentős növekedés a közeljövőben nem várható, évi 0,6-0,8 %-os teljes energiaigény-növekedés tételezhető fel.

A káros környezeti hatások csökkentése miatt is lényeges szempont az „energia-rugalmassági” együttható, azaz az egységnyi nemzeti jövedelem-növekedéshez szükséges energianövekmény változásának elemzése. Magyarországon a gazdaság energia-hatékonysága 1971 és 1987 között 30 %-kal javult. Ennek ellenére ez még mindig messze elmarad a fejlett piacgazdaságok energia-hatékonyságától. Az energia-jövő tervezésének szempontjából lényeges kérdés a hazai energiaforrások felhasználásának és az importált energiamennyiségeknek az aránya. A környezeti hatások szempontjából ezenkívül igen lényeges kérdés az energiaszerkezet alakulása, hiszen a különböző energiatípusok felhasználása eltérő környezeti hatásokkal jár. Emiatt is fontos, hogy a tervek szerint az elektromos és a gázenergiafelhasználás arányának növekedése várható. A szén nagymértékű felhasználásáról azonban egyelőre nem lehet lemondani. A szénbányászat távolról sem elegendően hatékony, e téren feltétlenül szerkezetváltásra van szükség. A fogyasztóknak két fő csoportja van, amelyek a szén döntő mértékben használják: háztartási-kommunális szektor, amely jó minőségű szén igényel és az erőműhálózat, amely alacsonyabb minőségű szénrel üzemel. Az előrejelzések szerint, a hazai szénigények jelenlegi lassan (lineárisan) csökkenő tendenciája megmarad a jövőben is. Ami a többi fosszilis tüzelőanyagot illeti, az olajtermelés a jelenlegi 1,8 Mt-ról 1,75 Mt-ra csökken 1995-re, és 1,5 Mt-ra 2000-re; a természetes gáz termelése pedig szintén csökkenni fog a jelenlegi 6,1 millió m<sup>3</sup>-ről 5,5 millió m<sup>3</sup>-re 1995-re, és 4 millió m<sup>3</sup>-re 2000-re.

Összességében, a szakemberek prognózisa szerint, a jövőben mindössze 0,6-0,8%/év növekedési ütemre számíthatunk, ami a teljes energiafogyasztást illeti. Ugyanez az érték az elektromos energia esetében 1,3-1,5 %/év.

Az energiatermelési tervek szerint, kombinált gáz-gőz erőművek építése is számításba jön. E rendszerek segítik az energiaellátás rugalmasságának növelését is. Várhatóan 700-800 MW teljesítményű egyes gáz-gőzerőműveket fognak építeni a század végére. Ami az elektromos erőműveket illeti, a 2000 utáni időszakra vonatkozóan még igen hozzávetőleges vizsgálatokat végeztek el. Új és biztonságos atomerőművek építése is egy lehetséges választás. A gazdaságossági követelmények mellett az energiatervek kialakítását az emissziócsökkentés stratégiája is döntő mértékben befolyásolja majd.

A különböző energiatermelési, energiagazdálkodási stratégiák környezeti következményeit abból a szempontból is össze kell hasonlítani, hogy a különböző léghő kibocsátások csökkentésére vonatkozó (vagy tervezett) nemzetközi követelményeknek mennyire tesznek eleget. Az egyes energia-szenáriókkal kapcsolatos számítások elvégzéséhez számtalan feltételezéssel kell élni, az eredmények tehát csak első, nagyságrendi becsléseknek tekinthetők. A „bázis”-szenárió például felteszi, hogy az energiapolitika és az energiatermelés szerkezete lényegében változatlan marad, tovább a széndioxid-emisszió csökkentése érdekében nem fogantatósítanak számottevő lépéseket. A „bázis”-szenárióhoz képest (1985-ös szinten), az ipari-termelési

szerkezet (mindenekelőtt a jelentős energiafogyasztású területek termelési szintjének) bizonyos változását feltételező scenárió a széndioxid-kibocsátás 12%-os csökkentését eredményezi. A különféle termelési, energiafogyasztási, energiaárakra vonatkozó paraméterek változtatásával, és az egyes változatok realizálásának mérlegelésével számos hasonló feltételes prognózis készült. A megfelelő stratégia kiválasztásánál - mint korábban említettük - lényeges szempont a nemzetközi ajánlásokkal összhangban a 20%-os emisszió-csökkentés elérése. E cél például akkor valósítható meg, ha az energia-hatékonyság a vizsgált (45-éves) időszakban évente 1.3%-kal javul, a főbb energiatípusok fajlagos árai pedig a következő mértékben növekednek: olaj 2%, szén 1.5%, villamosenergia 1.2%.

### **3.6. AZ ÉGHAJLAT VÁLTOZÉKONYSÁGÁNAK ÉS FELTÉTELEZETT VÁLTOZÁSÁNAK TÁRSADALMI-GAZDASÁGI ÖSSZEFÜGGÉSEI**

#### **Általános koncepcionális kérdések**

A globális éghajlatváltozások alapvetően újszerű kihívást jelentenek a társadalmi szintű stratégiai tervezés és döntéshozatal számára. Ez az alap- és alkalmazott, tovább a fejlesztő kutatásoknak, a gyakorlati alkalmazásoknak, a módszerek kiválasztásának újszerű kombinációit igényli, új típusú metodológiák alkalmazását tételezi fel a különféle társadalmi-gazdasági folyamatokkal kapcsolatos vizsgálatokban és döntéshozatali folyamatokban. Kovács (1989) részletesen elemzi a problémakör alapvető koncepcionális kérdéseit; az alábbiakban ezek közül kiemeljük a legfontosabb megállapításokat.

Általánosan tekintve a jövőnek van egyfajta az előzmények által determinált jellege, ugyanakkor az a tevékenységi szférától, időtartamtól függően változtatható is, azaz „normatív jövőként” is felfogható. A különböző fejlődési szakaszokban a „továbbélés” (a kialakult tendenciák egyszerű folytatódása) és a változtatás lehetősége eltérő. Ez utóbbi részben attól függ, hogy a régi növekedési és fejlődési pályákat kísérő ellentmondásokat kiegyenlítő mechanizmus mennyire épült be a rendszerbe. Fontos szerepe lehet annak is, hogy a változtatások lehetőségének és szükségességének megítélésével kapcsolatos nézetek is gyakran változnak. Hazánkban az elmúlt időszakot jellemző döntések és stratégiák a környezeti problémák megoldását nem segítették elő. A normativitás és a normatív jövőre építés felértékelődik a globális éghajlatváltozásokkal kapcsolatos döntésekben is. Az alapvető változások miatt a társadalmi-gazdasági fejlődés nem tanulmányozható a folyamatos fejlődést felvázoló trendek segítségével, hanem sokkal inkább a társadalmi-gazdasági fejlődés új összetettebb modelljeire van szükség. Legalább ennyire fontos annak a figyelembevételére, hogy a feltételezett globális éghajlatváltozás esetén kifejezetten tartós vagy tartósnak ígérkező tendenciák érvényesülhetnek. Tehát a természeti környezet fejlődési trendjei és az új társadalmi és gazdasági fejlődési trendek bonyolult rendszere között kell a hatáselemzési kutatásokkal kapcsolatot teremteni. Egyrészt úgy, hogy már rövid időn belül is meg kell hozni azokat az alapvető intézkedéseket, amelyek hosszabb távon vagy távlatokban az éghajlatváltozással összefügghetnek. Másrészt úgy, hogy a gazdasági-társadalmi fejlődést ösztönző döntések kapcsán tudatosan kell számolni az éghajlatváltozás normatív jellegével. A környezeti és ezen belül az éghajlati feltételekhez való hatékonyabb alkalmazkodás akkor is alapvető társadalmi-gazdasági kérdés, ha az egyirányú környezeti tendenciák egyértelműen nem, vagy még hosszú ideig nem kellő egyértelműséggel igazolhatók.

## **Az éghajlatingadozás és a globális éghajlatváltozás néhány társadalmi-gazdasági vetülete**

Az éghajlat ingadozása általában és a feltételezett éghajlatváltozás különösen jelentős mértékben módosít(hat)ja a természetes vízellátottságot. Ennek megfelelően feltételezhetően újszerűen kell kezelni a vízrendszerek, vízgyűjtő rendszerek, valamint a termelési zónák megváltozásának kapcsolatát. A nemzetközi vízrendszerben lévő édesvízkészlet országonkénti és térségenkénti elosztásában nem egyszerűen a nemzeti érdekek összehangolása kap majd nagyobb hangsúlyt egy jelentős következményekkel járó éghajlatváltozás esetén. Nem kizárt, hogy a termelési zónák megváltozása megkérdőjelezi az ökológia szempontból már ma is tarthatatlan országhatárok közötti térségekben való merev gondolkodást. A megváltozott termelési zónák közötti vízkészlet-elosztás, vagy az országhatárokon át történő szennyezőanyag terjedés mind olyan problémák, amelyek a nemzetközi jogban nincsenek kielégítően szabályozva. A vízkészletek módosulása tehát társadalmi, regionális illetve nemzetközi problémák forrása is lehet. Következésképpen a változó természeti feltételek, természeti erőforrások miatt általában, s az éghajlat változékonysága és esetleges változása miatt különösen az időbeli előrelátásról a szabályozásban és a jogalkotásban sem mondhatunk le. Ezért többek között célszerű elvégezni annak a prognosztikus vizsgálatát, hogy milyen változás várható a csapadék térbeli eloszlásában, ezzel kapcsolatban tanulmányozni kell a termelési zónák, növénytakaságok térségi elhelyeződését és tudatos áthelyezésének lehetőségét, valamint a kapcsolódó problémákat. Azt is fel kell mérni, hogy az áthelyezés és áthelyezés biológiai szempontokból elviselhető ritmusa, valamint az éghajlatváltozás időbeli skálája közötti összhang mennyire és milyen feltételek mellett biztosítható.

Hasonlóan globális és nagytérségű problémaként fogalmazódott meg a vízvédelmi és víztározó rendszerek kérdése. Ezek közé az infrastrukturális természetű rendszerek közé egyaránt tartoznak a tengerpartok védőgátjai, nemzetközi érdekelttségű víztározó-rendszerek stb. A lehetséges éghajlatváltozás új megvilágításba helyezi a víztározási problémákat is. A hazai víztározók lehetséges jövőbeni kiépítéséről korábban OMFB-tanulmány készült. Az utóbbi években viszont több tekintetben elvetették e terveket különböző ökológiai okok miatt. De a vízkészleteknek az esetleges nagyobb mértékű változékonyságára, vagy még inkább lehetséges csökkenésére való tekintettel célszerű lenne újból megvizsgálni a korábbi elképzeléseket figyelembe véve az ökológiai problémák megelőzésének szükségességét is.

Az éghajlat változékonyságával és változásával kapcsolatban számos más társadalmi-gazdasági probléma is felvethető például a növénytermesztés, az erdőgazdálkodás vagy például az energiaszükségletek területén. A megelőző védekezéssel illetve a feltételezett környezeti változásokhoz való alkalmazkodással kapcsolatos beruházások pénzügyi-gazdasági következményei is számottevőek lehetnek, amire a hatáselemzések során tekintettel kell lenni. Az ilyen beruházások elhagyása például „népességvándorlást”, a területhasznosítás jelentős módosulását vonhatja maga után. Az ilyen következmények ma sem csupán fikciók; a részben az éghajlatfluktuációkkal összefüggő olyan változások mint a Nagy Tavak vízszintjének, vagy a Misszisszippi vízhozamának csökkenése súlyos gazdasági következményekkel járt. A Szahel-övezetben a 70-es években bekövetkezett aszályok nyomán jelentékeny népességvándorlás volt megfigyelhető.

Az alkalmazkodás említett problémái természetesen eltérően érinthetik a társadalmakat a fejlettségi szintjüktől függően.

A természeti környezet változásait és ezek sorában az éghajlatingadozást és változást is kockázati tényezőként kell felfogni, amelynek társadalmi mérlegelése rendkívül összetett feladat.

Ugyancsak célszerű elkészíteni az éghajlatváltozás illetve a különféle éghajlatváltozási szcenáriók következményeinek és hazai tevékenységünk klíma-változást alakító hatásának mérlegét. E tényezők megismerési fokától függően olyan kell ajánlásokat kidolgozni a döntéshozók és a tervezők számára, hogy azok ne egyszerűen a passzív alkalmazkodás problémakörére szorítkozzanak.

## **A társadalmi-gazdasági fejlődés és a környezeti, éghajlati problémák megjelenése**

Az éghajlat társadalmi-gazdasági, közgazdasági összefüggései nemrégén kerültek a tudományos érdeklődés homlokterébe. A társadalmi-gazdasági fejlődés és fejlettség különböző szakaszaiban más-más közgazdasági kategóriának, más-más társadalmi tényezőnek volt kiemelkedő jelentősége. A fejlődés meghatározója sokáig a föld, majd a munkaerő és a tőke, mint közgazdasági kategóriák voltak, természetesen a többi tényező, egyebek között a technikai haladás, a környezet, a szervezés mellett. Az 1960-as, de főleg az 1970-es évek közepe óta a környezet vonta magára a figyelmet. Ennek két oka emelhető ki. Egyrészt az olajválság rámutatott a hagyományos energiaforrások véges voltára, s hasonlóképpen tudatosodott, hogy a nyersanyagbázisok is végesek, tehát a környezetet mint „feltételt” kezdték szemlélni. Másrészt, a különböző emberi tevékenységek hatására a környezet állapotában olyan változások következtek be, amelyek minőségi átalakulását eredményezték veszélyeztetve mind az emberi létfeltételeket, mind a társadalmi-gazdasági tevékenységek kifejtésének színterét. A környezet tehát mint „következmény oldal” is átalakulóban van.

A környezet akkor került a tudományos érdeklődés középpontjába, amikor abban - a társadalmi-gazdasági tevékenységek hatására - jelentős változások játszódtak le. A kutatások éppen ezért azokra a környezeti elemekre koncentrálnak, amelyek több tekintetben közvetlen kapcsolatban állnak az emberi létfeltételekkel, s amely hatások többé-kevésbé mérhetők is. Így a vizsgálatok körébe bekerültek a nem megújuló nyersanyag- és energiaforrások, valamint az egyes környezeti elemek, közegek (levegő, víz, talaj), illetve ez utóbbiak szennyezettségi fokának tanulmányozása. Egyre többen mutattak rá arra, hogy a gazdasági fejlődést több tekintetben korlátozza a környezet nem megfelelő állapota. Nordhaus és Tobin kimutatták (Samuelson, 1976), hogy az USA-ban az elmúlt évtizedekben a „tényleges gazdasági jólét” (Net Economic Welfare) lassabban nőtt, mint a bruttó nemzeti termék (GNP), mert az utóbbiból le kell számítani a környezet szennyeződésének nem fedezett költségeit és a modern urbanizáció más káros következményeit is. A környezet állapota így közvetett úton mérhetővé vált.

A környezet növekedési tényező jellegének kimutatására eredményes kísérletet tett Korompai (1989). A környezet gazdasági növekedési tényező jellegének kimutatását azonban számos szemléletbeni és statisztikai számbavételi ok és korlát akadályozza. (Ezeket részletesen lásd pl. Gerle, 1982). Számbavételi nehézség adódik amiatt is, hogy nehezen lehet elkülöníteni a környezetnek a növekedésre gyakorolt egyedüli hatását, hiszen a környezet hatása a többi növekedési tényezővel együtt jelenik meg a gazdasági növekedésben, mint eredményben. Ez az egymásra hatás nagymértékben függ a kialakított gazdasági - a termelési és a fogyasztási - struktúrától, amit jelentős mértékben befolyásol a technikai fejlettség szintje is. E szempontok feltehetően érvényesek a levegőkörnyezetre illetve az éghajlati feltételek hatásaira is.

A környezettel kapcsolatos vizsgálatok csak azokra a környezeti problémákra irányították a figyelmet, amelyek az emberiséget már közel három évtizede foglalkoztatják, mert veszélyeztetik. A környezetnek azok az elemei, amelyek eddig nem jelentek meg vagy a gazdasági növekedést vagy az emberi létfeltételeket korlátozó tényezőként, nem kerültek be a vizsgálatokba. Az éghajlat ezért a környezeti vizsgálatokban háttérbe szorult. (Jól tükrözi ezt a helyzetet az is, hogy a világmodellek, globális jelentések szinte kizárólagosan a környezetnek az előbbieken említett kérdéskörével foglalkoznak, igaz, hogy azokkal sokoldalúan és sokszínűen.)

Az utóbbi időben megjelentek a globális éghajlatváltozás lehetséges hatásait elemző tanulmányok is. Ezek megkülönböztetett figyelmet fordítanak az éghajlati változásoknak a mezőgazdaságra, a vízgazdálkodásra (Nováky B., 1989) és az energiagazdálkodásra gyakorolt megfigyelt és lehetséges hatásaival. A világmodellek, „globális” jelentések közül a Globál 2000 (1985), már az éghajlatnak külön fejezetet szentelt.

A globális felmelegedést tárgyaló tanulmányok sorában helyet kell kapniuk az éghajlatingadozások és az éghajlatváltozás társadalmi-gazdasági hatásvizsgálatainak is. Ennek

keretében el kell jutni olyan környezetvédelmi (környezetfejlesztési) stratégiák kidolgozásáig, amelyek figyelembe veszik az éghajlatváltozás és a társadalom közötti kölcsönkapcsolatokat, s szempontokat nyújtanak egyes - éghajlatérzékeny - tevékenységek optimalizálásához.

## **Az éghajlat és a társadalmi-gazdasági folyamatok összefüggései**

A környezetvédelmi stratégiák kidolgozásának első lépése a klíma és a társadalmi-gazdasági feltételek közötti kapcsolat tisztázása. E kapcsolat kétirányú, és a kölcsönhatások három típusa különíthető el (Kates, 1985): egyszerű interakció, amely az éghajlati és a társadalmi változások hatását a népességre, a társadalmi-gazdasági tevékenységre, a régiókra és a nemzetekre gyakorolt hatáson keresztül veszi figyelembe; az interaktív (feedback) modell, amely az éghajlati és a társadalmi változások hatására választ is keres, a biofizikai és a társadalmi jellemzőkön keresztül érvényesül, megváltoztatva a társadalmi tevékenységet; az interaktív (feedback) modellnek az a változata, amely a biofizikai és a társadalmi jellemzőkön keresztül nemcsak a társadalmi tevékenységre hat, hanem az alapvető fizikai és társadalmi folyamatokhoz és struktúrákhoz is visszacsatol. Ez utóbbi modell vizsgálatakor három kérdésre kell választ keresni: hogyan jellemezhető a társadalom, a társadalmi szervezet és a társadalmi változás?; hogyan tanulmányozható és miként írható le a társadalmi válaszreakció, az alkalmazkodás és az adaptáció?; hogyan vizsgálható az interakció a társadalom és a természet, valamint a társadalmi változás és az éghajlati változás között? E kérdésekre a következő válaszok adhatók (Kates, 1985).

A társadalom jellemzésére nemzetektől és régióktól függően más-más megközelítésre helyezhető a hangsúly; alapvetően azonban az alábbi lehetőségek közül lehet választani: a társadalom és a gazdaság egészének vagy valamely résztevékenységének modellezése; a perturbációk és az extrém vagy szokatlan társadalmi események felismerése (ezek megfelelnek az extrém természeti vagy éghajlati anomáliáknak); csoportoknak, megélhetési módoknak, szubrégióknak vagy a tevékenységeknek a megkülönböztetése az éghajlati változás vagy változékonyság vonatkozásában potenciálisan, sebezhetőségük szerint; a társadalmi faktorok, mechanizmusok, trendek vizsgálata, amelyek a sebezhetőség mértékét változtathatják.

A lehetséges társadalmi válaszreakciók: a szén-dioxid termelésének, illetve a termelés trendjének változtatása; a szén-dioxid eltávolítása a légkörből; az éghajlat és az időjárás módosítása; adaptáció az anticipált és tapasztalt változáshoz. Az interakciók szokásos vizsgálati módjai pedig a következők: okozati és korreláció elemzés; tapasztalatok; modellek és szimuláció.

Az éghajlati hatásvizsgálatok - mint az előzőekben láttuk - olyan interaktív modell(ek)nek az alkalmazását jelentik, amely vizsgálatok átfogják a fentiekben megjelölt mutatóknak, elemzéseknek és vizsgálati módoknak a körét, s kétirányú kapcsolatot valósítanak meg a klíma és a társadalom között. A hatás az éghajlati eseményektől indul. Az azokra reagáló egységeken keresztül különböző (elsődleges, másodlagos stb.) hatások, következmények vizsgálatán keresztül lehet eljutni a válaszreakció, azaz az alkalmazkodás útjainak felvázolásához. A kör itt bezárul, a különböző (érzékenységi, biofizikai, társadalmi hatás- és alkalmazkodási reakció) tanulmányok adják az integrált hatásbecslést, ami részét képezi az integrált hatás/alkalmazkodási vizsgálatoknak. Ennél az eljárásnál a természet (éghajlat) és a társadalom kapcsolata a közvetlen út vizsgálata mellett szükségessé teszi a közvetett utak vizsgálatát is; ezt szolgálja a különböző, a természeti (éghajlati) változásoknak elsősorban kitett jelenségek (egyedek, populációk, fajok) érzékenységi vizsgálata. A hatásvizsgálatok elsődleges, másodlagos és a további hatásait több lépcsőben veszik elemzés alá. A közvetlen és a közvetett hatások egyidejűleg (párhuzamosan) és egymást követően is léteznek, s a hatások erősíthetik vagy gyengíthetik egymást. Ez utóbbit azért is tartjuk fontosnak megemlíteni, mert szakértői vélemények szerint az éghajlat-társadalom kapcsolatrendszer vizsgálatánál az előrehaladást nagymértékben akadályozza az, hogy nem kellően ismertek azok az eszközök, amelyek segítségével az éghajlati hatások elválaszthatók más változókétól (De Vries, 1985).

## **Az éghajlat és a társadalom interaktív kapcsolata: a vizsgálatok módszertani kérdései**

Az éghajlat és a társadalom egymásra hatásának vizsgálata olyan kétirányú összefüggés tanulmányozását feltételezi, amelyben egyik irányból elemezhető a társadalmi-gazdasági tevékenységeknek az éghajlatra gyakorolt hatása, a másik irányból pedig az éghajlatnak (éghajlatváltozásnak) a társadalmi-gazdasági tevékenységekre kifejtett hatása. E kétirányú hatásvizsgálatnál alapfeltételezés, hogy a társadalomnak az éghajlati változásokra gyakorolt visszahatása nem független a társadalom fejlettségétől, ahogyan az éghajlati változások társadalomra gyakorolt hatása is tükrözi a társadalom fejlettségét (Czelnai, 1980). Általánosságban elmondható - bár ez az állítás még további kutatást igényel -, hogy egy társadalom annál kevésbé van kitéve a természeti (köztük az éghajlati) változásoknak, minél fejlettebb gazdaságilag. Ez azonban nem jelenti azt, hogy egy gazdaságilag fejlett társadalom ne kényszerülne a természeti hatások figyelembevételére. Több esetben a társadalomnak a természeti katasztrófák legyőzése legalább olyan jelentős és körültekintést igénylő feladata, mint a gazdasági építés.

Az éghajlatnak és az éghajlat változékonyságának a társadalomra és a gazdaságra gyakorolt hatása több jelenségen keresztül mérhető. A szakértők többsége egyetért abban, hogy a népesség mozgásán, mozgási irányán és egészségügyi helyzetének változásán keresztül mutatható ki leginkább e hatás. A népesség mozgását a tartósan meleg (és száraz) időszakokat illetve a feltételezett felmelegedést kísérő szárazság, fokozódó vízhiány, a megfelelő táplálkozás feltételeinek szűkössege, a munkafeltételek és körülmények rosszabbodása váltja (válthatja) ki. Az éghajlati ingadozások, az ismétlődő és viszonylag tartós nyári hőhullámok és más meteorológiai „stressz-helyzetek” jelentős mértékben hathatnak az emberek egészségére, munkaképességére, teljesítményére. Egy (környezet-, vagy éghajlatváltozási) átmeneti időszakban ezért a lakossági migráció iránya, a mortalitási és a morbiditási struktúra változása (összekapcsolva természetesen az erdő- és a mezőgazdaságban, a víz- és energiagazdálkodásban lejátszódó változásokkal), s az ezeket tükröző adatok információs forrást jelenthetnek az éghajlati változások hatásának vizsgálatához.

Az éghajlat-társadalom interaktív kapcsolatot elemző vizsgálatok a társadalmi jellegű adatok négy típusára építenek (Farhar-Pilgrim, 1985): statisztikai adatok (népesedés, mortalitás, foglalkoztatottság, kórházi ágyak száma stb.); írott formában megjelenő társadalmi jellegű adatok (történelmi dokumentumok vagy más „írással” emlékek stb.); megfigyelési adatok (releváns események rendszeres megfigyelése, nem rendkívüli jelenségek mérése stb.); válaszkapcsolatot tükröző adatok (pl. közvéleménykutatási eredmények). Ezekben az adatokban eltérő mértékű a bizonytalanság. Legnagyobb bizonyossággal a statisztikai adatok fogadhatók el, de ezek hiányában a többi adatforrás is igénybe vehető. Célszerű arra törekedni, hogy az adatokban meglévő - szükségyszerű - bizonytalanság a minimálisra legyen csökkenthető.

Az éghajlat változékonyságának, feltételezett változásának és ezek hatásainak elemzéséhez és előrejelzéséhez néhány általánosított előrejelzés- és scenárió-készítési metodológiai elvet célszerű konkretizálni. A rendszer/alrendszer elv szerint a vizsgálat tárgyát kívánatos egyaránt alulról és felülről felépíteni. Jelen esetünkben ez azt jelenti, hogy a hazai viszonyok közötti vizsgálat a globális és a nagytérsegi összefüggésekből kiindulva elkezdhető, de „ütköztetni” kell az országon belüli gazdasági, társadalmi, környezeti, technológiai alrendszerekkel, azok jellemző sajátosságaival. Ennek keretében elemzés tárgyai lehetnek a természeti és az antropogén eredetű természeti károsodások (éghajlati változások), valamint a környezet (éghajlat) és a társadalom közötti hatásláncnak az éghajlati változásoknak elsődlegesen kitett egységei (mint pl. a vízháztartás). Ebben az összefüggő rendszerben kitüntetett szerepet kaphat a technológia, a technológiai fejlettség vizsgálata, hiszen a technológia betöltheti a környezeti és a társadalmi változások közötti adapter szerepét.

A lokális rendszerekre irányuló vizsgálatok mikro- és makro- szinten egyaránt elvégezhetők, sőt akár egy család és egy közösség szintjén is. Bár mind az alrendszerek, mind a szintek között különböző erősségű hierarchiák kialakulhatnak ki, létezik azok között olyan hálózati struktúra is,

amely módot nyújt a kooperativitásra, a célszerű együttműködésre. Ez utóbbi megvalósítása elősegítheti az éghajlat és annak változása, valamint a társadalom közötti kapcsolat zökkenőinek csökkentését.

A folyamatok és fordulópontok egymás melletti és egymást kiegészítő létezése arra irányítja a figyelmet, hogy a tartós, folyamatos, ismétlődő változások sok esetben elvezetnek olyan küszöbértékekhez, fordulópontokhoz, amelyeket követően a folyamatok új irányt vehetnek. Az üvegházhatás növekedésével fel kell készülni egy új minőségi helyzet kialakulására, s egyúttal a társadalmat is fel kell készíteni a változások befogadására. Mindezek figyelembevételével, a különböző hatások (és a fokozatos adaptáció) eredményeképpen a társadalom az átmeneti állapotból - amennyiben megtalálja a megváltozott természeti (éghajlati) feltételekhez való alkalmazkodás útjait, módjait - átmehet egy új egyensúlyi állapotba. Fontos annak hangsúlyozása, hogy az éghajlatban bekövetkező változások nem robbanásszerűen zajlanak le, hanem hosszú időtávban, lassú változást eredményezve a társadalomban. A folyamatos változások létezése és a küszöbértékek elérése illetve új minőségre áttérés egymást követő láncolata mindig is jellemzője a fejlődésnek. Az éghajlati változások sorában is egymást követik a felmelegedésre és a lehűlésre utaló változások, s a mozgásban ismétlődés fedezhető fel. Ez az ismétlődő jelleg egyúttal alapot képez időbeli analógiák keresésére és következtetések hasznosítására. Amíg azonban az új egyensúlyi állapot ki nem alakul, addig a természet és a társadalom, sőt a társadalom résztvevői között is újabb és újabb konfliktusok keletkeznek és oldódnak meg. A konfliktus megjelenhet a műszaki területen, a gazdaságban, a társadalomban és a környezet-társadalom viszonyában (Nováky E. és Kovács, 1989). Ez a konfliktusos állapot - ami előkészíti a társadalom áttérését az új egyensúlyi állapotra - nem rövid ideig tart, hanem viszonylag hosszabb idejű, „tartós” állapot, ami azt is jelenti, hogy az új állapotra csak folyamatosan lehet áttérni. Az átmeneti állapotban az új egyensúlyt jellemző tulajdonságok egyre gyakoribbá válnak, míg nem a régi állapotot jellemző tulajdonságok már alig lelhetők fel.

A tendencia jellegű változásnak küszöbértékeken (fordulópontokon) keresztüli átalakulása új tendenciákba, más megvilágításba helyezi az éghajlati szélsőségek kérdését is. Valamely egyensúlyi állapotban lévő rendszerben növekvő gyakorisággal ismétlődő szélső értékek, extrém események arra utalhatnak, hogy a meglévő egyensúlyi állapot új állapotba tér át (a kiugró értéket mutató események gyakoriságának változásából gyakran lehet következtetni új jelenségek, helyzetek várható kialakulására). Az extrém események elemzését a szakemberek az éghajlat-társadalom interaktív kapcsolat vizsgálatában is lényegesnek tekintik (Heathcote, 1985). Az események váratlanságának tanulmányozása azért is kíván körültekintő elemzést, mert a társadalom egy adott szituációban általában nincsen felkészülve a váratlan eseményekre (éppen ezért váratlanok) és ezért társadalmi következményeik többnyire jelentősek. Így van ez nagyobb árvizek, szélviharok, különböző természeti konfliktusok (katasztrófák) idején, de a műszaki meghibásodások okozta, katasztrófát előrejelző váratlan események is hasonló hatással lehetnek.

A tér- és időtényező figyelembevételét a hatásvizsgálatokban több szempont is indokolja. Mindenekelőtt az, hogy a globális jelenségek (mint pl. az éghajlati változás) térségenként eltérően jelentkeznek, eltérő a mértékük és az intenzitásuk. Ebből következően a globális változások térségi megjelenését nem lehet közvetlenül származtatni a globális változásokat mutató értékekből, hiszen eloszlásuk - főleg hatásukban - nem egyenletes. Vannak (lehetnek) olyan térségek, ahol a globális változásból eredő hatás jelentősebb eltérést indukál, mint másutt, talán a terület nagyobb érzékenysége vagy az ott lakók változás iránti eltérő fogékonysága miatt. Célszerű tisztázni azt, hogy valamely hatás milyen okok következtében jelenik meg eltérő erősséggel egy régióban a többihez viszonyítva. Az egyes régiók éghajlati változásának elemzéséhez a régiót körülvevő nagyobb térséget érő természeti és antropogén hatásokat is figyelemmel kell kísérni, hiszen a térségi változások - rendszer és alrendszerei elv értelmében is - nemcsak a régió belüli, hanem az azt határoló régiókból érkező hatásokból is összegeződnek. Ezért is növekszik meg - többek között - az „interregionális” kapcsolatok érzékelésének jelentősége.

Az időtényezőt tekintve először az időbeli késleltetést említjük. Ez egyik oldalról az éghajlati változásoknak a társadalom és a gazdaság területén időben késleltetett módon való megjelenésével, másik oldalról pedig azzal jellemezhető, hogy az éghajlati változások által elindított társadalmi-



gazdasági hatások válaszreakciói az éghajlatra időben szintén késleltetve jelennek meg. Nem remélhető tehát, hogy ha megtaláljuk a társadalmi válaszreakciókat az éghajlati változásokra, akkor azzal rövid időn belül megoldódik a probléma is. Ahogyan nem jelennek meg azonnal a társadalmat érő hatások, ugyanúgy a visszahatások aktivizáló szerepe sem azonnali. További szempont, hogy a különböző időtávú jelenségek együttesen (egyszerre) vannak jelen és egymásra is hatnak. A folyamatos, tartós és a rövidebb időszakot átfogó jelenségek egyidejű létezése különböző jellegű vizsgálati és előrejelzési módszerek alkalmazását teszi szükségessé.

A hatásvizsgálatok elvégzését az is megnehezíti, hogy a vizsgálat tárgyai eltérő mértékben, azaz eltérő mérési szinten kvantifikálhatóak. Több esetben a kutatás tárgya nem teszi lehetővé a mérés legmagasabb szintjének alkalmazását (pl. a társadalom tagjainak jólétét kifejező mutatók esetében), máskor a kapcsolatoknak csak verbális módon leírható jellege vagy a konkrét mérések hiánya miatt. Az éghajlati hatásvizsgálatokban a különböző mérési szinteken megjelenő események és vizsgálatok együttesen alkothatnak rendszert. Például, a légköri jelenségek numerikus modellekkel írhatók le, a társadalmi hatások többsége pedig a sorrendi mérés szintjén mérhető. Ezt a jelenséget az éghajlati hatásvizsgálatokhoz hasznosítható adatok jellege is már előrevetítette.

A hatásvizsgálatok alapvető módszertani sajátosságai tehát a következők (Farhar-Pilgrim, 1985): interdiszciplinárisak és interaktívak; szintetizáló, aggregáló és integratív jellegűek; inkluzívak (a hatásbecsléseket felhasználó szakterületek ismereteit, szakértőit bevonják a hatásbecslés folyamatába); döntés-orientáltak.

A különböző hatásvizsgálatokban eredményesen alkalmazhatók az előrejelzések (prognózisok és jövőképek) kidolgozásához kifejlesztett jövőkutatási módszerek (Besenyey-Gidai-Nováky E., 1977). Jellegük alapján a matematikai-statisztikai eljárásokra épülő előrejelzési módszerek, a kollektív szakértői megkérdezésen alapuló előrejelzési módszerek és a modellek, illetve modellezési eljárások csoportja különíthető el. Az éghajlat változékonysága és feltételezett változása társadalmi-gazdasági összefüggéseinek vizsgálatához mindhárom csoport nyújthat alkalmas eljárásokat. A matematikai-statisztikai eljárások a tartós tendenciák alakulásának és a különböző jelenségek közötti kapcsolatoknak a feltárásához tartalmaznak megfelelő eszközöket. A változékonyság meghatározásánál alkalmazott számítások az extrém események vizsgálatát is megalapozhatják. A számszerűen nehezen jellemezhető jelenségek és hatások vizsgálatához a szakértői vélemények adhatnak információkat. Az eljárások hasznosítása különösen akkor előnyös, ha olyan társadalmi hatásokat vizsgálunk, amelyek a mérés alacsonyabb szintjén megjelenő eseményeket tartalmaznak. Szakértőket célszerű felkérni például akkor, ha a globális felmelegedés biofizikai hatásain túllépve, a közvetett társadalmi hatásokat elemzik. A különböző szakértői vélemények a jövőbeli lehetséges eseményeknek egy-egy változatát képezhetik. A modellek illetve a modellezési eljárások köréből az analógiát hasznosító eljárások és a kölcsönhatás vizsgálatok kaphatnak megkülönböztetett figyelmet az éghajlati hatásvizsgálatoknál. Az analógiát hasznosító eljárások a térbeni és időbeni analógia alapján adhatnak ismereteket a feltárandó jelenség természetéről, várható bekövetkezéséről. A térbeni analógia hasznosításakor olyan országok, régiók társadalmi-gazdasági jellemzőinek vizsgálatára nyílik lehetőség, ahol az éghajlati viszonyok olyanok, mint amilyenek várhatóan kialakulnak a vizsgált régióban. Az időbeni analógia érvényesítésekor olyan - már lejátszódott eseményekhez rendelt - időintervallumok vizsgálatát kell elvégezni, amely alatt hasonló éghajlati változások zajlottak le, mint amelyek a jövőben várhatóak. Ehhez nyújthatnak segítséget pl. a paleoklimatológiai vizsgálatok. A kölcsönhatás-vizsgálatok választ adhatnak arra, hogy az éghajlati változásokat és a társadalmi-gazdasági változásokat jellemző mutatók közötti jelenlegi és várható kölcsönös összefüggés erőssége miként módosítja a vizsgált rendszer eseményeinek várható bekövetkezési valószínűségi értékeit akkor, ha a hatásokat tételesen figyelembe vesszük. A kölcsönhatás-módszer arra is választ ad, hogy valamely esemény induló valószínűségi értékének módosulása (pl. biztos vagy teljesen bizonytalan esemény feltételezése esetén) hogyan változtatja meg a kölcsönhatásba bevont más események várható valószínűségi értékeit, azaz mennyire érzékeny a rendszer bizonyos változtatásokra. Az eljárás konzisztens rendszerbe rendezi a matematikai-statisztikai és a kollektív szakértői megkérdezésen alapuló eljárások nyújtotta előrejelzési értékeket, így hatékonysága és megbízhatósága is nagyobb

a többi eljárásénál. Mivel az eljárás a kölcsönhatás vizsgálatát állítja az érdeklődés középpontjába, ezért egyaránt vizsgálható vele az éghajlati változásoknak a társadalmi-gazdasági jellemzőkre és a társadalmi-gazdasági jellemzőknek az éghajlat megváltoztatására gyakorolt hatása, s így megvalósítható az interaktív elemzés. A különböző módszerek alkalmazásakor azonban nem hagyhatók figyelmen kívül a különböző modellhibák, a modellváltozók pontosságának eltérő volta és a modellparaméterek időbeli stabilitásának követelményei. A hibák részben csökkenthetők a különböző típusú módszerek egymásra épülő és egymást kiegészítő alkalmazásával.

A különböző típusú előrejelzési eljárások olyan scenáriókat eredményezhetnek, amelyek különböző feltételes (másodfajú) klímaprognózisokhoz rendelik hozz a társadalmi-gazdasági következményeket. A különböző módszerekkel készülő hatásvizsgálatokat még akkor is el kell végezni, ha egyesek úgy vélekednek, hogy a társadalmak és a társadalmak rendelkezésére álló források közötti differencia lényegesen nagyobb, mint az éghajlati jellemzőkben illetve az éghajlati változások következtében előálló társadalmi következményekben lévő differenciák.

Az éghajlat változékonyságának és feltételezett változásának hazai társadalmi-gazdasági összefüggéseit keresve, lehetségesnek látszik, hogy a megfelelő jellemzők, változók beépüljenek egy már működő magyar környezetvédelmi modellbe. A környezeti közegek (levegő, víz, talaj, élővilág) és a különböző társadalmi-gazdasági tevékenységek közötti jelenbeni kapcsolatra építve egy olyan szimulációs modell került kidolgozásra (Nováky E., 1987), amely alkalmas arra, hogy hazánk környezeti állapotát a 2000-2020 közötti időszakra előrejelezze különböző gazdaságpolitikai változások függvényében. E vizsgálatok alapot képezhetnek a környezetvédelem és a változó környezeti állapotokhoz való alkalmazkodás stratégiáinak kidolgozásához is.

Összefoglalóan megállapítható, hogy: a jövőkutatással foglalkozó közgazdászok körében van érdeklődés az éghajlati változások társadalmi-gazdasági összefüggéseinek vizsgálatára; az éghajlat változékonysága és feltételezett változása, valamint a társadalmi-gazdasági jellemzők között interaktív kapcsolat létezik, ami az éghajlat változása következtében előálló biofizikai változásokon túlmenően az első-, a másodrendű és a további hatásokra is kiterjed; a hatásvizsgálatok elvégzésekor különböző metodológiai elveket kell érvényesíteni, amelyek a rendszer-alrendszer, a folyamat-fordulópont, a konfliktus-egyensúly, a váratlanság, a tér/időtényező és a kvantifikálási szintek komplexumát fogják át; a hatásvizsgálatok készítéséhez eredményesen alkalmazhatók a jövőkutatásban bevált módszerek (a matematikai-statisztikai eljárásokra épülő, a kollektív szakértői megkérdezésen alapuló módszerek és a modellezési eljárások). Ezek kombinatív alkalmazása - már kifejlesztett környezetvédelmi modellek kiterjesztésével - a klímascenáriókra (is) épülő társadalmi-gazdasági prognózisok kidolgozását alapozhatják meg.

## 4. NEMZETKÖZI EGYÜTTMŰKÖDÉS

A földi légkörrel kapcsolatos változások megfigyelése és vizsgálata - természetszerűen - elképzelhetetlen nemzetközi együttműködés nélkül. 1780 és 1795 között Európa több országára kiterjedően működött már meteorológiai megfigyelőhálózat (a „Societas Meteorologica Palatina”; Czelnai, 1979). 1873-ban megalakult a Nemzetközi Meteorológiai Szervezet (a WMO elődje); századunk ötvenes éveitől kezdődően pedig szervezett világméretű együttműködés jött létre, amely kiterjed a meteorológiai megfigyelési adatok cseréjére, egyeztetett feldolgozására, a légköri folyamatok tudományos kutatására is. A légkört illetve az éghajlatot befolyásoló emberi tevékenységek illetve az esetlegesen (feltételezhetően) változó éghajlat társadalmi-gazdasági hatásai jelentőségének felismerése új vetületet adott a meteorológiai kutatásoknak, kiszélesítette a tudományközi és a nemzetközi együttműködés kereteit is. E fordulat döntően a 60-as évek végén illetve a 70-es években ment végbe. Az 1979-ben megtartott (első) Éghajlati Világkonferencia összegezte az addig elért eredményeket - mind a meteorológia, mind pedig a közvetlenül leginkább érintett területek (vízgazdálkodás, növénytermesztés, energiagazdálkodás stb.) szempontjából. A konferenciát követően sokoldalú éghajlatkutatási program kezdődött Éghajlati Világprogram címmel. Ezzel részben párhuzamosan, a tágabb értelemben vett globális környezeti problémákra is nagyobb figyelem összpontosult és külön kutatási program indult a (természeti) környezet Globális Változásának témakörében. Az 1988-as év - feltételeken - újabb mérföldkönek tekinthető a témakörhöz kapcsolódó nemzetközi együttműködés folyamatában: az ENSZ Közgyűlés állásfoglalását követően a témakör nemzetközi „politikai” vonatkozásai (a légköri kibocsátások nemzetközileg egyeztetett csökkentése) is külön hangsúlyt kaptak, a kutatások és a teendők koordinálása érdekében kormányközi bizottság (IPCC) alakult.

A továbbiakban részletesebben áttekintjük a globális éghajlati rendszer vizsgálatával kapcsolatos főbb nemzetközi tevékenységeket, programokat.

A GARP klímadinamikai alprogramja, a globális klímarendszer és a klímaváltozás lehetőségének vizsgálata; 1967-1979

1967-ben indította útjára a Globális Légkörkutatási Programot (GARP) a WMO és az ICSU. E program és az 1968 óta működő Meteorológiai Világszolgálat tervezése és szervezése végsősoron az 1961-es és 1962-es ENSZ Közgyűlésnek a világűr békés felhasználására vonatkozó határozatát követte (Götz, 1977). Témánk szempontjából döntő jelentőségű, hogy - a rövidebb időskálájú légköri (időjárási) folyamatok beható tanulmányozása mellett - a GARP „második” célkitűzése az éghajlat fizikai alapjának jobb megértése lett.

Egy 1971-ben megjelent M.I.T.-tanulmányt („Az ember hatása az éghajlatra”), majd az 1972-ben Stockholmban tartott az emberi környezet változásainak kérdésével foglalkozó ENSZ-konferenciát követően a GARP keretében megerősödött az éghajlati rendszer tanulmányozásának igénye. 1974-ben WMO-ICSU-UNEP szervezésben rendeztek konferenciát e témakörben Wijkben. A hangsúly már az éghajlat múltbeli és lehetséges jövőbeli változásain és annak hatásain volt. A GARP keretében 1974-ben „klímadinamikai alprogramot” indítottak és javasolták, hogy 1980-tól kezdődően klímadinamikai dekád kezdődjön. A wijk konferencián behatóan foglalkoztak az éghajlati rendszer modellezésének kérdésével („nemcsak a légkört kell tágabb szemszögből tekintetbe vennünk, hanem a meteorológián kívül egy sor egyéb diszciplínát is be kell vennünk a kutatásba”; a konferenciajelentés alapján Götz, 1977), beleértve a légkört, az óceánok, a krioszféra, a talajfelszín (tágabban a litoszféra) és a biomasz (a bioszféra) folyamatait és kölcsönhatásait.

A 70-es években jelentős éghajlati anomáliák is ráirányították a figyelmet a klímakutatásra. Így mindenekelőtt az évtized elején a Sahel-övezetben tragikus következményekkel járó szárazságról vagy az 1972-es „El Nino” évről van szó.

Az éghajlatkutatás megélénkülését és elismerését ösztönözte az antropogén éghajlatváltozással kapcsolatos hipotézisek megerősödése (pl. Budiko, 1971). A tudományos vitában számos érv hangzott el a globális lehűlés, a „szokásos” klímafluktuációk jelentkezése és a valószínűsíthető globális felmelegedés mellett is, az antropogén hatások fokozódó jelentőségét azonban egyre inkább

elismerték. Ez is jelentősen hatott a témával kapcsolatos nemzetközi együttműködés további kibontakozására.

Ugyancsak a 70-es években számottevően fejlődtek ill. kiegészültek a földi környezet változásait megfigyelő nemzetközi hálózatok. A Globális Környezeti Megfigyelő Rendszer (GEMS) 1979-től a WCP szerves része lett; fokozatosan kiépült a Léggöri Hátterszennyeződés Megfigyelő Hálózat (BAPMoN); 1976-tól kezdődően külön ózon-megfigyelő program kezdődött (Izrael, 1983).

A témakörrel kapcsolatos nemzetközi együttműködést nagymértékben elősegítették a megfigyelési és kutatási eredményeket közreadó kiadványok. Ez az időszak fordulatot hozott az információ-áramlásban is: a tudományos publikációk mellett lényegében nemzetközi „híradók” jelentek meg elsősorban a GARP égisze alatt.

A nemzetközi konferenciákkal illetve a GARP-pal párhuzamosan nemzeti éghajlati programok is készültek. A szűkebb értelemben vett éghajlati vizsgálatok mellett eltérő hangsúllyal, de a hatáselemzésekkel kapcsolatos feladatokat is felvették ezekbe a programokba. Az USA Tudományos Akadémiájának geofizikai programja 1974-ben, például, kiegészült az éghajlat-víz témával; az eredményeket összegző tanulmány 1977-ben jelent meg s abban már az éghajlat lehetséges változásának a természetes vízellátottságra vonatkozó következményeit is tárgyalták. Az USA Nemzetvédelmi Egyeteme „Éghajlatváltozás 2000-ig” címmel éghajlati hatásvizsgálatot készített a mezőgazdaság számára. A Szovjetunió Hidrometeorológiai Állami Bizottsága is részletes nemzeti kutatási és megfigyelési programot dolgozott ki kapcsolódva többek között a GARP-hoz.

A Nemzetközi Alkalmazott Rendszerelemzési Intézet (IIASA, Laxenburg) ebben az időszakban szervezett az éghajlat-energia témakörben kiterjedt kutatási programot. A kutatások keretében az energiaforrások és az energiaigények globális kérdéseit vizsgálták az éghajlattal kapcsolatos mindkét irányú összefüggésekkel együtt (a klímafluktuációk hatása az energiagazdálkodásra, ill. az energiarendszereknek a légkörre, az éghajlatra gyakorolt hatásai).

A klímakutatás „modern korának” első - a 70-es években végbemenő - időszakát lényegében az 1979-ben Genfben tartott Éghajlati Világkonferencia (WCC) zárta le (WCC, 1979). A konferencián képviseltette magát az UNESCO, a FAO, a WHO, a UNEP, az ICSU, a IIASA és a meteorológusok, légkörfizikusok mellett számos más tudományág képviselői. A megfigyelésen (az éghajlati rendszer monitoringján) és a modellezésén kívül a konferencia foglalkozott a társadalmi-gazdasági hatásokkal, a káros következmények elkerülésének, enyhítésének lehetséges teendőivel is. Egyértelművé vált, hogy mindhárom területen csak nemzetközi összefogással lehet eredményeket elérni, mivel: a megfigyelt jelenségek, folyamatok globális léptékűek, a kutatás (különösen a modellezés) rendkívül sokrétű és nagy erőforrásokat igényel, a megfelelő környezetpolitika (mindenekelőtt az antropogén hatások csökkentése) csak akkor lehet hatásos, ha minden érintett ország alkalmazza. „A világ nemzeteinek együtt kell munkálkodniuk azon, hogy megőrizték a talajok termőképességét, hogy megakadályozzák a világ vízkészleteinek, erdőségeinek és termőterületeinek ésszerűtlen kihasználását, hogy megfékezzék az elsivatagosodást, tovább hogy csökkentsék a légkör és az óceánok szennyeződését” (a WCC deklarációja nyomán, Götz, 1981).

## **Az Éghajlati Világprogram. Az 1979-1988-as időszak**

Az 1979-es Éghajlati Világkonferencia ajánlásait figyelembe véve a WMO VIII. kongresszusa elfogadta az Éghajlati Világprogramot (WCP). Ez a GARP éghajlati alprogramjának jelentős kiterjesztését jelentette. A program 1980-ban indult négy fő témakörben: „Éghajlati Adatprogram” (WCDP), „Éghajlati Alkalmazások Programja” (WCAP), „Éghajlati Hatások Programja” (WCIP) és „Éghajlati Kutatási Program” (WCRP) címmel. E nagyszabású program keretében a WMO együttműködik a UNEP-pel (WCAP) és az ICSU-val (WCRP).

A globális környezeti problémák átfogó tanulmányozásának igénye ekkor már nemcsak az éghajlattal kapcsolatban merült fel. A téma iránt egyre nagyobb mértékben kezdtek érdeklődni a „döntéshozók” is, hiszen a természeti erőforrásokban ill. a gazdaság környezeti feltételeiben végbemenő változásokat már nem lehetett

figyelman kívül hagyni. (E felismerést természetesen olyan drasztikus események is elősegítették, mint a 70-es években történt két olajár-robbanás.) Ebben az időszakban születtek a magasszintű politikai-stratégiai döntések megalapozása érdekében az olyan globális környezeti előrejelzések, mint a „jelentés” az USA elnöke számára (Global, 1980), egy a légkörre szorítókozó UNESCO-tanulmány (UNESCO, 1982), vagy a Környezeti és Fejlesztési Világbizottság, az ún. Brundtland-bizottság jelentése (Brundtland, 1987). E tanulmányok is hangsúlyozták a problémakör globális jelentőségét, s ezzel összhangban a nemzetközi együttműködés szükségességét.

Ebben az időszakban az ICSU önálló nemzetközi kutatási programot is kezdeményezett. A Nemzetközi Geoszféra-Bioszféra Program (IGBP) lényegében a teljes természeti környezet tanulmányozását tűzte ki célul. A kutatási koncepcióját 1984-1986 között fogalmazták meg, 1986-ban külön szervezőbizottságot hoztak létre („Special Committee for the IGBP”), s 1988-ban készült el az IGBP kutatási feladatait, teendőit részletező munkadokumentum. E témakör szerves részét képezi a légköri rendszer tanulmányozása is. Az IGBP szervezésének döntő okai ugyanazok, mint amelyek indokolták a WCP útrairndítását: egyrészt annak felismerése, hogy az ember tevékenysége ill. hatása a környezetre - bizonyos vonatkozásokban - már összemérhető a természeti folyamatok hatásának nagyságrendjével; másrészt annak egyértelmű felismerése, hogy a természet erőforrásai végesek. Az IGBP számos témája közül itt kiemeljük az „Éghajlatváltozás hatásai a földi ökörendszerekre” című témát. Az éghajlatingadozások fizikai alapjainak, folyamatainak vizsgálatát - a WCP keretében - újult erővel folytatták világszerte a meteorológusok, légkörfizikusok. Ebben az időszakban - a korábbi általános cirkulációs modelleket is felhasználva - összetett globális klímamodelleket készítettek (ill. fejlesztettek tovább). A numerikus modellezés eljárásait és eredményeit számos konferencián mutatták be, így, például az 1982-ben Tokióban az óceán-modellekkel foglalkozó konferencián vagy az ugyanabban az évben Leningrádban rendezett konferencián (WCP, 1982).

Az Éghajlati Világprogrammal részben párhuzamosan, részben ahhoz kapcsolódva az ICSU „SCOPE”-bizottsága („A Környezeti Problémák Tudományos Bizottsága”) az éghajlatingadozások hatásvizsgálatainak módszereit vizsgálta (SCOPE, 1985).

Az első WCC-t követően a IIASA is aktívan bekapcsolódott a klímakutatás egyes területeibe, különösen a „klíma-társadalom” és a „klíma-természeti és mezőgazdasági rendszerek” témakörében. A hatáselemzések eredményeit többek között az 1980-ban tartott a klíma- és a társadalomkutatás kérdéseivel foglalkozó értekezleten (Ausubel és Biswas, 1980), valamint az 1983-ban „Az ökörendszerek és a társadalom érzékenysége a klímaváltozásra” címmel tartott konferencián foglalták össze (Parry, 1985). A IIASA-nak az éghajlati hatásvizsgálatok körében végzett munkái között alapvető fontosságú az NSzK Kutatási és Műszaki-fejlesztési Minisztériumának támogatásával készített „Európa ökológiai fennmaradása felé” megnevezésű tanulmány. A tanulmány keretében Broewer és Falkenmark elemezték a feltételezett éghajlati változásoknak Európa vízkészletére gyakorolt hatásait. A tanulmánynak e részét a szerzők az 1988. júniusában Amszterdamban tartott 8. Nemzetközi Jövőkutatási Konferencián is bemutatták.

A 80-as években tovább javult a kutatási eredményekre, tudományos eseményekre vonatkozó információk nemzetközi áramlása. Egyre újabb „hírmondók” jelentek meg, amelyek elősegítették a szakemberek tájékozódását. A WCP keretében az első „Newsletter” 1980-ban jelent meg (az ICSU, a UNEP és a WMO közös lapjaként). Emellett az ICSU külön SCOPE-híradó kiadását is kezdeményezte. Számos kutatóintézet, nemzeti szolgálat is útjára indította „hírlevelét”, így például a Kanadai Klímaközpont vagy az USA Nemzeti Légkörkutató Központja.

Ezekben az években is számos olyan szélsőséges éghajlati anomália fordult elő, amelyek - ha nem is kellő tudományos megalapozottsággal, de - ráirányították a figyelmet egy kibontakozó globális éghajlatváltozás lehetőségére. 1982/83-ban világszerte nagy károkkal járó éghajlati jelenségeket regisztráltak (pl. mezőgazdasági aszályokat, az El-Nino jelenség ismétlődését) a Sahel övezetben is újra jelentkezett a súlyos szárazság, 1988-ban - többek között az USA nagy területein - ugyancsak rendkívüli aszály következett be.

Ezzel párhuzamosan az intenzív és egyre hatékonyabb váló eszközökkel folytatott megfigyelések révén még pontosabb kép alakult ki a légköri nyomgázok fokozatos „feldúsulásáról”, az üvegházhatás erősödéséről, a sztratoszférikus ózon mennyiségének csökkenéséről. Egyre egyértelműbbé - ha nem is bizonyított - vált annak lehetősége, hogy az emberi tevékenység (akaratlanul is) drasztikusan megváltoztathatja a környezet és ezen belül az éghajlat állapotát (Clark, 1986; Kellogg, 1987).

Az antropogén-eredetű klímaváltozás lehetőségeire és ezzel párhuzamosan a földi légkör összetételében végbemenő változásokra és feltételezhető következményeikre vonatkozó megfigyelési, vizsgálati eredmények egyre nagyobb visszhangra találtak. A beavatkozás, a kiváltó okok megszüntetése vagy legalábbis hatásaik mérséklése - a folyamatok globális természete miatt - elképzelhetetlen nemzetközi együttműködés nélkül. A földi légkör minőségének védelme érdekében az adott időszakban lényegében példa nélkül álló nemzetközi egyezmények születtek: így 1979-ben ill. 1985-ben előbb a nagytávolságra eljutó, országhatárokon áterjedő levegőszennyező anyagok megfigyelésére vonatkozóan (Genfi Egyezmény), majd ehhez kapcsolódóan már konkrétan a kénkibocsátások és a nitrogénoxid-kibocsátások csökkentéséről. Az „üvegház-gázok” ügye azonban lényegében egyelőre érintetlen maradt.

Az Éghajlati Világprogram kiemelkedő nemzetközi eseménye volt az 1985. októberében az ausztriai Villachban megrendezett konferencia. A konferencia részletesen tárgyalta azt a kérdést, hogy a légkör széndioxid-tartalmának növekedése milyen mértékben módosít(hat)ja a Föld éghajlatát, s ennek milyen következményei lehetnek az egyes emberi tevékenységek terén. A konferencia záródokumentuma az éghajlatkutatás társtudományai művelőinek és a politikai döntéshozóknak a figyelmét kívánta felhívni arra, hogy a Föld globális felmelegedése már a viszonylagos közeljövőben - a jövő század első felétől kezdődően - reális környezeti probléma és a felmelegedésnek lényeges kihatásai lehetnek a globális ökoszisztémákra, a mezőgazdaságra, a vízkészletekre, összességében a társadalom egészére. A konferencia arra is felhívta a figyelmet, hogy fokozni kell a tudomány és politikai döntéshozás aktív együttműködését az éghajlati változást-változékonyságot figyelembe vevő fejlesztési alternatívák kidolgozásában.

A villachi konferenciát követően a Világprogram ajánlásainak megfelelően az éghajlati változások és a politikai döntéshozás közötti szakadék áthidalását szolgáló programok, kutatások szakértői előkészítésében tevékeny szerepet vállalt az IIASA. A UNEP, a WMO, a kanadai Éghajlatkutató Központ, az USA Éghajlati Bizottsága, valamint a holland környezeti kérdésekkel foglalkozó minisztérium támogatásával 1986. júniusában az ausztriai Laxenburgban rendeztek szakértői találkozót. A szakértői munkaértekezlet éghajlati scénáriók kidolgozására tett javaslatot a társadalom és a gazdaság éghajlatra leginkább érzékeny területein, köztük a vízgazdálkodásban, és hangsúlyozta a különböző tevékenységi területeken végzett éghajlati hatásvizsgálatok regionális szintű integrálásának fontosságát.

A villachi konferencia ajánlásaira adott közvetlen válaszok egyikeként 1987. októberében létrehozták az éghajlati hatásvizsgálatok európai munkabizottságát. A munkabizottság első szakértői találkozájának szervezését Hollandia vállalta magára. Ilyen hazai előzmények után szervezték meg a hollandiai Noordwijkerhoutban 1987. októberében a „Bioklimatikus változások és a földhasználat változásai” témájú szakértői találkozót holland intézmények mellett az NSzK kormányának, az Európai Közösségnek és a UNEP-nek a támogatásával.

A vizsgált időszakban rendkívül sok és sokféle az éghajlathoz kapcsolódó konferenciát tartottak. Ezek nyomán egyre jobban kirajzolódtak a globális környezeti problémák összefüggései és ezek sorában az éghajlat változékonyságának, esetleges változásának és e változások hatásainak jellemzői, folyamatai.

A Nemzetközi Hidrológiai Egyesülés (IAHS) támogatásával is több nemzetközi konferenciát is szerveztek az éghajlat és a víz, az éghajlat és a vízgazdálkodás, az éghajlat és a hidroszféra kapcsolatait tekintve. Az 1981-ben Canberrában tartott „Tengerszintek, jégtakaró és az éghajlati változások” témájú konferencia áttekintette a különböző időléptékű (100 év - 1 millió év) éghajlati változásoknak a tengerszintekre és a szárazföld állandó jégtakarójának kiterjedésére gyakorolt hatásaival kapcsolatos ismereteket és elméleteket, elősegítette a témakör nemzetközi kutatásának megszervezését. Egy másik jelentős nemzetközi konferenciát „Éghajlati változások és éghajlati változékonyság hatása a vízjárásra és a vízkészletekre” témakörben 1987-ben ugyancsak az IAHS szervezésében Vancouverben tartották.

1987-ben került sor ismét Villachban - a WCP keretében - az antropogén eredetű éghajlatváltozás addigi főbb eredményeit, a becsült éghajlati scénáriókat és a lehetséges hatásokat összegző tudományos találkozóra. Az ezen a fórumon bemutatott a globális felmelegedésre vonatkozó lehetséges „prognózisok” a továbbiakban meghatározó jelentőségűek lettek a különféle hatástanulmányok számára. A tanácskozást az éghajlatváltozással kapcsolatos politikai, gazdasági stratégiákkal foglalkozó nemzetközi értekezlet követte ugyanebben az évben Bellagioban.

## **A nemzetközi együttműködés jelenlegi időszaka. 1988-1989**

1988 az éghajlatváltozással kapcsolatos nemzetközi együttműködés újabb fordulópontját jelentette: a WMO 1987-es X. kongresszusának ajánlása nyomán, a WMO és a UNEP együttes fellépésével és szervezésében megalakult az „Éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi bizottság” (IPCC). Az ENSZ 43. Közgyűlése (1988-ban) elfogadta a 43/53. számú határozatát a „Globális éghajlat megőrzéséről a jelenlegi és a következő generációk számára” és a konkrét teendők kidolgozására a WMO-t és a UNEP-et, illetve az IPCC-t kérte fel. A magasszintű nemzetközi bizottság 1988. novemberében tanácskozott először és három munkacsoportot hozott létre az éghajlati rendszerrel kapcsolatos tudományos kérdések, hatáselemzések és a teendők (stratégiák) témakörében. A munkacsoportok azóta aktívan tevékenykednek és meghatározott ütemterv szerint munkadokumentumokat készítenek az eddigi eredmények átfogó értékelésére és a további tevékenységek meghatározására.

A földi légkör védelmét és áttételesen a feltételezett éghajlatváltozás egyik okának kiküszöbölését is célozta az első valóban globális környezetvédelmi egyezmény megkötése: az 1988-as Bécsi Egyezményben, majd az ehhez kapcsolódó Montreáli Jegyzőkönyvben az aláíró országok a sztratoszférikus ózonréteget lebontó anyagok kibocsátásának csökkentéséről állapodtak meg.

A fenti egyezmény kereteit messze meghaladó nemzetközi szerződésre tett indítványt Málta. A köztársaság képviselője volt a kezdeményezője a már említett ENSZ-határozatnak, majd az IPCC 1989. februári konferenciáján olyan „Éghajlati Egyezmény” megkötését javasolta, amely jogi és szervezeti keretet nyújtana, tovább nemzeti, regionális és nemzetközi szinten lehetővé tenné a klímaváltozással kapcsolatos tervek összehangolását és megvalósítását.

Egyre nagyobb számban szerveznek az éghajlati modellezéssel, az éghajlatváltozás detektálásával, a hatáselemzéssel kapcsolatos nemzetközi szakértői találkozókat. 1989-ben többek között sor került: a UNEP égisze alatt az éghajlattal foglalkozó nemzetközi kutatóhálózatok együttműködését elősegítő tanácskozásra (március; Boulder); az éghajlatváltozás detektálási módszereivel foglalkozó konferenciára Amherstben (május; Massachusetts); a Nemzetközi Földrajzi Unió Éghajlati Bizottságának Szervezésében a „Klímaváltozások a történeti és a modern korokban” című konferenciára (június, Brno); a „Globális éghajlatváltozás és változékonyság modellezése” témában rendezett tanácskozásra (szeptember; Hamburg); az „Éghajlati és víz” konferenciára (szeptember; Helsinki). A londoni környezetvédelmi konferencián 124 ország képviselői vettek részt, s ezen bejelentették, hogy a Közös Piac országai az ózonréteget bontó kémiai anyagok termelését és használatát 1996-1997-re megszüntetik. Szeptemberben Boulderben tartottak konferenciát az éghajlatváltozás és az erdők témakörében; novemberben Toulouse-ban találkoztak az „Éghajlati fluktuációk és azoknak az Atlanti óceán menti országokra gyakorolt társadalmi-gazdasági hatásai” témájában; decemberben a hollandiai Lunterenben tartották „A klímaváltozás ökológiai hatása a táj alakulására” című konferenciát. E felsorolás közel sem teljes.

A jelenlegi együttműködési törekvések, egyeztetések általában az 1990-re tervezett II. Éghajlati Világkonferenciára való készülődés jegyében zajlanak. Ehhez illeszkednek az IPCC munkacsoportjainak munkatervei is és a leendő kormány szintű, kormányközi cselekvési programok kidolgozásának tervei.

## **A nemzetközi együttműködés hazai vonatkozásai**

A globális légköri, éghajlati problémák iránt a hazai szakemberek körében is jelentős érdeklődés nyilvánult meg az elmúlt két évtizedben (Péczy, 1973; Ambrózy, Czelnai és Götz, 1977; Mészáros, 1977; Czelnai, 1980; Probáld, 1981). Az MTA Meteorológiai Tudományos Bizottsága 1977-ben foglalkozott az éghajlatkutatások hazai helyzetével (Ambrózy, 1977). A megállapítások, ajánlások sorából kiemelhetjük a következőket: „Számos jel mutat arra, hogy az éghajlat várható alakulásának - ingadozásainak és esetleges változásainak - elemzése ... a következő évtizedben a nemzetközileg koordinált kutatások legelső vonalába fog kerülni. ... A klimatológiai vizsgálatok várható hazai fejlődésének irányvonala úgy tűnik, hogy a jövőben egyre inkább a globális méretű éghajlati folyamatok elemzésére irányul majd ... Szem előtt tartva a

GARP 1980-ban kezdődő klímadinamikai dekádját, el kellene készíteni az esetleges magyar részvétel terveit." A 70-es években egyrészt a nemzetközi kutatási eredményeket nyomon követték a szakemberek, másrészt kísérletek történtek az éghajlati rendszer vizsgálatára (Götz-Dévényi-Faragó, 1978; Mika, 1979; Faragó, 1979).

A GARP témába való bekapcsolódás elősegítése érdekében az MTA Meteorológiai Tudományos Bizottsága GARP-Albizottságot hozott létre, amely foglalkozott a GARP éghajlati alprogramjának kérdéseivel is (Götz, 1977, 1981; Faragó, 1981).

A 80-as években az OMSZ-nál az éghajlatmodellezés lehetőségeinek elemzése (Mika, 1981; Czelnai, Götz és Iványi, 1982), s a numerikus éghajlati modellek fejlesztése ill. adaptációja is megkezdődött (Pálvolgyi és Práger, 1987; Práger és Kovács, 1988; Szalai, 1989).

Az éghajlat globális változékonyságának, változásának regionális - földrajzi térségünkre vonatkozó - jellemzői különféle statisztikai eljárásokkal becsülhetők; e módszerek kidolgozása és alkalmazása is megkezdődött (Mika, 1988). E témakörben, ill. az ehhez kapcsolódó, a szélsőséges meteorológiai, éghajlati jelenségek tanulmányozására vonatkozó témában együttműködés alakult ki egyrészt a Lengyel Hidrometeorológiai Szolgálattal, másrészt az USA Nemzeti Légkörkutató Központjával (Antal és Glantz, 1988).

A hatáselemzésekre - a nemzetközi tapasztalatok felhasználásával - kezdeti lépések történtek mindenekelőtt a vízgazdálkodás, növénytermesztés, a talajokra vonatkozó változások területén (Nováky B. et al., 1985; Szilágyi, 1989; Petrasovits, 1988). Eredményeiket a hazai kutatók különböző nemzetközi tudományos fórumokon is bemutatták: így többek között az „Éghajlati kényszerek és az emberi tevékenység” címmel 1980-ban Laxenburgban (IIASA) tartott tanácskozáson Czelnai (1980; OMSZ) foglalta össze az éghajlatnak az Alföldön megfigyelt természeti és társadalmi-gazdasági hatásaira vonatkozó addigi ismereteket; a vízgazdálkodás témájában Szesztay (1986; Vízgazdálkodási Intézet) az 1986-os laxenburgi szakértői értekezleten vett részt (ahol őt beválasztották a „Vízkeszletek” c. munkabizottságba is); a talajtani hatásvizsgálatok témájában Kerényi és Pinczés (KLTE Földrajzi Intézet) az 1987-es, a hollandiai Nordwijkerhoutban „Bioklimatikus változások és a földhasználat változásai” címmel rendezett konferencián tartott előadást (Kerényi, 1987; Pinczés, 1987); az 1989-es „Éghajlat és víz” konferencián (Helsinki) többek között Nagy (KVM) ismertette a vízkeszletek változásával foglalkozó tanulmányát. Az ICSU-SCOPE szervezésében 1985-ben a hatáselemzések módszertani kérdéseit tárgyaló kézikönyvnek a vízgazdálkodás kérdéseit tárgyaló fejezetének elkészítésében magyar szakemberek is részt vettek (Nováky B. és Szesztay K., Vízgazdálkodási Intézet ill. Pachner Cs., Nyugatdunántúli VIZIG).

A kutatásokat - mindenekelőtt a modellfejlesztéseket - nagymértékben elősegítette az Akadémiától elnyert támogatás. Az elmúlt években e témában több tanulmány jelent meg. A nemzetközi együttműködésbe való közvetlen bekapcsolódás elsősorban a levegőkémia témaköréhez, valamint egy NCAR-OMSZ megállapodás keretében az éghajlati fluktuációkkal járó szélsőséges meteorológiai események vizsgálatához kötődik; utóbbit ugyancsak támogatja az MTA.

A témakörrel kapcsolatos hazai tudományos tevékenység, együttműködés különösen az utóbbi években intenzívebbé és szervezettebbé vált. E folyamat részben az IPCC megalakulásával ill. a 2. Éghajlati Világkonferenciára való készülődés jegyében felgyorsult. Ennek ellenére a nemzetközi tevékenységben - az éghajlatmodellezés, a „regionalizálás” és a hatáselemzések terén - nem jelentős a közvetlen hazai részvétel, közreműködés. Ugyanakkor szakembereink hatékonyan bekapcsolódtak a levegőszennyező anyagok kibocsátásával, transzmissziójával, légköri folyamataival kapcsolatos nemzetközi együttműködésbe. Említésre méltó, hogy hazánk is aláírta a kén- és a nitrogén-dioxid-kibocsátások, valamint az ózonréteget lebontó CFC-anyagok kibocsátásának csökkentését előíró nemzetközi egyezményeket.

A légköri, éghajlati, hatáselemzési kutatásokra, a nemzetközi találkozókra vonatkozó egyre gyarapodó mennyiségű információknak az érintett szakemberekhez való eljuttatása érdekében híradó készül negyedévenként „Atmoszféra” címmel (kiadója az OMSZ). A nemzetközi tapasztalatok alapján célszerű továbbfejleszteni a „környezeti” témában érdekelt kutatók informális hálózatát. Ez a kapcsolatrendszer és a nemzetközi együttműködésben való részvétel, a szakmai információcseré - részben az MTA és a KVM támogatásával - az elmúlt években már jelentős fejlődésnek indult.



## 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A TOVÁBBI FELADATOK

1Az éghajlat változékonyságával és változásával kapcsolatos témakör főbb kérdéseinek és eddigi eredményeinek áttekintéséből kitűnik, hogy egyrészt a légkör hosszútávú állapotváltozásai jelentős mértékben hatnak a természetes ökoszisztemekre és számos társadalmi-gazdasági tevékenységre, másrészt e változások természetes kényszerei, okai mellett azok antropogén előidézője is egyre valószínűsíthetőbb lehetőséggé vált.

E folyamatok szoros kölcsönhatásban vannak a természeti környezet többi elemének változásaival. Az éghajlat változékonysága és esetleges változása közvetlen hatással van a hidroszférára, a krioszférára és a bioszférára. Az antropogén hatások egyidejűleg befolyásolják a légkör összetételét, minőségét, állapotát, az éghajlatot és a természeti környezet más elemeit.

A gazdasági, termelési tevékenységek környezetalakító következményei között napjainkra kiemelkedő jelentőségűvé váltak az antropogén eredetű légköri kibocsátások. Ezek növekvő mértékben módosítják a légköri széndioxid mennyiségét, egyes légköri nyomgázok koncentrációját, ami a légkör sugárzási tulajdonságainak alapvető megváltozására vezet. A kibocsátásokban döntő szerepe van a fosszilis tüzelőanyagok elégetésének, emellett nem elhanyagolható egyes ipari, mezőgazdasági tevékenységek „melléktermékeként” a légkörbe kerülő gáznemű anyagok mennyisége sem.

A levegőkörnyezet, az éghajlat változásai és az ezekkel is összefüggő környezeti változások az emberi tevékenység számos területét érintik. E tanulmányban a vízgazdálkodás, a mezőgazdaság, az erdőgazdálkodás és az energiagazdálkodás egyes „éghajlatfüggő” problémáit külön is részleteztük, valamint áttekintettük a környezet- és ezen belül az éghajlatváltozással kapcsolatos általánosabb érvényű társadalmi-gazdasági összefüggéseket, az e változásokhoz való társadalmi szintű alkalmazkodás főbb kérdéseit.

A témakör időszerűségének több oldala van, nevezetesen: a környezetgazdálkodás növekvő jelentősége, a természeti erőforrások felértékelődése, a társadalmi-gazdasági fejlődés jelentékeny „környezetfüggése”, az antropogén környezetmódosítás mértékének rohamos növekedése. Az emberi tevékenység fokozódó mértékben hat a levegőkörnyezetre is és jelenleg már nagyon valószínűvé vált, hogy e hatások globális méretűek és esetlegesen irreverzibilisek vagy belátható időn belül az lehetnek.

Az éghajlat magyarországi sajátosságainak előrejelzése az ismeretek mai fokán a nem kizárható lehetőségek scenárióinak előállítását és a hozzájuk tartozó valószínűségek becslését jelenti. Mivel ma nincs olyan eszköz, amely erre egymagában képes lenne, a feladatot célszerű három részre bontani: meg kell becsülni a légkör összetételében és más külső kényszerekben várható változásokat, az ebből eredő globális léptékű változást, s végül az ebből következő lokális sajátosságokat. A légkör összetételének kutatása nem kimondottan hazai léptékű feladat. Ugyanakkor a nemzetközi mérési programokhoz biztosítani kell a vállalások teljesítését (mérés, elsődleges feldolgozás, adat-továbbítás stb.). Néhány szennyezőanyag (pl. troposzférikus ózon, aeroszolok) mérésében a nemzetközi vonatkozásokon túlmenően is érdekelt vagyunk, különösen, ha tekintetbe vesszük ezek közvetlen egészség- és környezetvédelmi vonatkozásait. A globális léptékű változások előrejelzésére a klímamodellezés több lehetőséget kínál. A modellek alapján a szükséges globális éghajlati scenáriók előállíthatók (illetve hozzáférhetők). A lokális sajátosságok becslésében eddig elért eredmények csak „első közelítéseknek” tekinthetők, e téren a továbbiakban minőségi fejlődés szükséges az eddig feltárt összefüggéseket térben és időben tovább kell finomítani, megközelítve ennek a jel/zaj arány által megszabott korlátait. A globális modellek eredményeinek lokális skálára történő transzformációja, azaz a lokális „specifikálás” statisztikai módszerei olyan hibaforrásokat eredményeznek, amelyek alkalmazhatóságukat a hatásvizsgálatokban erősen megkérdőjelezzik. Emiatt szükséges a feltárt összefüggések alaposabb fizikai értelmezése és további sokoldalú megalapozása.

Az említett változások és hatásaik lehetőségével - a számottevő kockázat miatt - akkor is foglalkozni kell, ha azok ténye nem vagy még hosszú ideig nem kellő egyértelműséggel igazolható. Az éghajlat változékonyságához, az éghajlatingadozásokhoz való alkalmazkodás tanulmányozása, hatékonyságának javítása mindenképpen szükséges, a változékonyság és az esetleges alapvető változás okainak, folyamatainak, hatásainak vizsgálatai szorosan összefüggnek.

A fentiekkel összhangban a további kutatások fő területei a következők.

- A természetes és az antropogén éghajlati kényszerek vizsgálata, különösen a légköri kibocsátások összetételének, mennyiségének számbavétele, a kibocsátásokat is érintő környezetgazdálkodási politikai kérdései, a kibocsátások mérséklésének technológiai, közgazdasági problémái.

- A levegőkörnyezet, az éghajlat és tágabban véve az éghajlati rendszer összetevőinek (a légkör mellett kiemelten a vízjárások, vízkészletek, lefolyás) megfigyelése, a változások felismerésének követelményei és a monitoring-rendszerrel kapcsolatos elvárások (pontossági, reprezentativitási, az idősorokkal kapcsolatos homogenitási, a térbeli és az időbeli felbontóképességre vonatkozó sajátosságok). A megfigyelésekből származó információk adatbázisának fejlesztése; a „változás-detektálással” összefüggő, a megfigyelőrendszert és az adatbázist érintő követelmények.

- Az éghajlati rendszer változékonyságának vizsgálata, a múltbeli ingadozások elemzése empirikus és statisztikai módszerek segítségével.

- Az éghajlati rendszer modellezése; érzékenységvizsgálatok, első- és másodfajú prognózisok lehetőségeinek feltárása, a globális eredmények „regionalizálása”.

- Hatásvizsgálatok módszereinek fejlesztése a különösen klímaérzékeny területeken az elsődleges hatások felmérésére (elsősorban a vízjárások, vízkészletek, természetes ökörendszerek területén). A társadalmi-gazdasági tevékenységeket, a gazdálkodást érintő hatások elemzése, különös tekintettel a vízgazdálkodásra, a növénytermesztésre, az erdőgazdálkodásra és az energiagazdálkodásra; a természeti (ezen belül az éghajlati) és a „technológiai” hatások kapcsolatának vizsgálata.

- Az éghajlat változékonyságának és esetleges változásának hatásaihoz való alkalmazkodás kérdései.

A kutatások szükségessé teszik a különböző tudományterületek képviselőinek hatékony együttműködését különösen az antropogén levegőkörnyezet- és éghajlatmódosítás, valamint az éghajlati prognózisok, scenáriók értelmezésének, a hatáselemzések elvégzésének kérdéseiben. A szakterületek képviselői közötti a kutatási eredményekre vonatkozó információáramlást, véleménycserét és a kutatási együttműködést szervezeten is elő kell segíteni.

A témakörben rendkívül széleskörű és intenzív nemzetközi együttműködés alakult ki. Ennek fejlődését és formáit is részletesen bemutatja a tanulmány. A nemzetközi háttérrel több tényező teszi különösen indokoltá: a vizsgált problémák globális jellege, a folyamatok vizsgálatának módszerei, az antropogén okok mérséklésének összefüggései, a következmények kölcsönhatásai. E nemzetközi tevékenységben a továbbiakban célszerű még hatékonyabban közreműködni, a nemzetközi együttműködéssel kapcsolatos információkat pedig széles körben terjeszteni az érintett hazai szakemberek között.

## IRODALOM, HIVATKOZÁSOK

- Ambrózy P., 1977: A hazai éghajlatkutatás és a hosszútávú előrejelzések helyzete. Kézirat.
- Ambrózy P., Czelnai R., Götz G., 1977: Éghajlatváltozások és az éghajlati rendszer modellezése. Fizikai Szemle, 2.
- Ambrózy P., Faragó T., 1988: Recent severe winters in Hungary: meteorological approach and some energy supply/demand aspects. In „Identifying and coping with extreme meteorological events”, OMSz, 281-235.
- Ambrózy P., Faragó T., F. Iványi Zs., Mika J., Nováky B., Práger T., Szalai S., Zákonyi J., 1989: Az éghajlat vál-tozékonysága és változása: okok, folyamatok, környezeti és társadalmi-gazdasági következmények. OMSz, kézirat
- Antal E., Faragó T., M.H. Glantz, 1988: On the concept of extreme meteorological and climatic events. Időjárás, 92, 269-275.
- Antal E., M. H. Glantz (eds.), 1988: Identifying and coping with extreme meteorological events. Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSz), Budapest
- Antal E., 1988: Comparative analysis of the irrigation water requirement and aridity condition. In: „Identifying and coping with extreme meteorological events”, OMSz, Budapest
- Antal E., 1987: Agrometeorológiai kutatások az Országos Meteorológiai Szolgálat keretében. Időjárás, 91, 68-79.
- Antal E., 1986: Éghajlatváltozás, aszály, mezőgazdaság. MTA-előadás, kézirat.
- Ausubel, J., A. K. Biswas (eds.), 1980: Climatic constrains and human activities. IIASA, Laxenburg
- Bach, W. et al. (eds.), 1980: Interactions of energy and climate. Reidel.
- Bach, W., Pankrath, J., Williams, J., 1980: Interactions of Energy and Climate. Proceedings of an International Workshop held in Münster, Germany, March 3-6, 1980.
- Barnett, T. P., 1984: Long-term trends in surface temperature over the oceans. Mon. Wea. Rev., 112, 303-312.
- Barnola, J., 1987: Vostok ice core provides 160,000 year record of atmospheric CO<sub>2</sub>. Nature, 329, 408-414.
- Bendefy L. és V. Nagy I., 1969: A Balaton évszázados vízszintváltozásai. Műszaki Kiadó.
- Bergthorsson, P., Bjornsson, H., Dyrmondsson, O., Gudmundsson, B., Helgadottir, A., and Jonmundsson, J.V., 1988: The effect of climatic variations on agriculture in Iceland. In: Parry, M.L., Carter T.R. and Konijn, N.T. (eds.): The Impact of Climatic Variations on Agriculture, Vol. 1, D. Reidel Publ., Dordrecht.
- Besenyi L., Gidai E. és Nováky E., 1977: Jövőkutatás, előrejelzés a gyakorlatban. Módszertani kézikönyv. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó.
- Biswas, A.K., 1980: Crop-climate models: a review of the state of the art. In „Climatic constrains and human activities” (eds: J. Ausubel, A.K. Biswas), IIASA, Proc. Series, No.10, 75-92.
- Bolin, B., Jager J. and Döös B.R., 1985: The greenhouse effect, climatic change and ecosystems. In: An Assessment of the Role of Carbon Dioxide and Other Radiatively Active Consituents in climate Variations and Associated Impacts, UNEP/WMO/ICSU Villach, Austria.

- Bolle H., J., Seiler, W. and Bolin, 1985: Other greenhouse gases and aerosols. In: An Assessment of the Role of Carbon Dioxide and Other Radiatively Active Constituents in Climate Variations and Associated Impacts, UNEP/WMO/ICSU, Villach
- Boncz J. és Mika J., 1984: A hazai növénytermesztés éghajlati feltételeinek alakulása a klímaváltozásokkal összefüggésben. „A légköri erőforrások hasznosítása az energiaellátásban Magyarországon”, OMSz Hiv.Kiadv. LVII, 134-146.
- Borzenkova, I.I., Zubakov, V.A., 1983: The late-atlantic climatic optimum of the Holocene as a model of global climate of the early 21-st century US/USSR Meeting of Experts on Antropogenic Climatic Change. Leningrad, p19.
- Broecker, W.S., 1987: Unpleasant surprises in the Greenhouse, Nature 328, 123-126.
- Brouwer, F., Falkenmark, M., 1988: Water availability in Europe. IIASA, Laxenburg.
- Brundtland, J.H. et al. (Eds.), 1987: Our common future. Report of the World Commission for Environment and Development, London
- Budiko, M.I., 1971: Éghajlat és élet (orosz nyelven). Gidrometeoizdat, Leningrád
- Bukovszky Gy., 1986: A Velencei-tó kiszáradásának vizsgálata. Hévízi Vándorgyűlés.
- Callaway, J.M., Currie, J.W., 1985: Water resource systems and changes in climate and vegetation. In „Characterization of Information Requirements for Studies of CO2 Effects: Water Resources, Agriculture, Fisheries, Forests and Human Health” (ed. White M.R.), Washington DC, US. Department of Energy.
- Callaway, J.M., Decker, W.L., 1985: Characterizing the Effects of Climate Change on Surface Water Supply and Supplemental Irrigation Demand in the Nishnabotna River Basin (kézirat)
- Callis, L.B., 1978: On the complex nature of atmospheric phenomenon. WMO, No. 511, 193-202.
- CCD, 1987: Canadian Climate Impacts Program. Climate Change Digest, CDD-87-01.
- Changon, S.A., 1985: Climate fluctuations and impacts: The Illinois case. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 66.
- Chen, R.S. and Parry, M.L., 1987: Policy-Oriented Impact Assessment of Climatic Variations. IIASA, Laxenburg.
- Chen, R.S., and Parry, M.L. (eds.), 1987: Climatic Impacts and Public Policy, UNEP/IIASA 54 pp.
- Ciborowski, P., 1989: Sources, sinks, trends and opportunities. In: The Challenge of Global Warming (ed. D.E. Abrahamson), Island Press Washington D.C., Cavelo, California, 213-230.
- Clark, W.C., 1985: Scale relationships in the interactions of climate, ecosystems and societies. In „Forecasting in the social and natural sciences” (eds. K. Land and S. Schneider); Proc. Social Science Res. Council Conference at Boulder, USA.
- Clark, W. C., 1986: Who cares about global change ? Environment, 28, 1.
- Cohen, J.L., 1982: Risk and uncertainty in water resources management. Water Resources Research, 18, 1.
- Craig, H. and Cho C.,C., 1982: Methane: The record in polar ice cores. Geophys Res. Letter, 9, 1221-1224.
- Crummay, F.A., 1986: Monitoring the homogeneity of UK climatological data. Meteor. Mag., 115, No.1366, 133-142.
- Czelnai R., 1979: Societas Meteorologica Palatina. Légkör, 3., 1—10.
- Czelnai R., 1980: Climate and society: the Great Plain of the Danube Basin. IIASA Proc. Series, 10, 149-180.
- Czelnai R., Götz G. és Iványi Zs., 1982: A mozgó légkör és az óceán. OMSz, Budapest.

- Csapody I., Csapody V. és Rott F., 1966: Erdei fák és cserjék. Országos Erd. Főigazgatóság.
- Dávid A., 1987: A műtrágyázás hatékonyságának időjárási feltételei. Időjárás, 91, 160-166.
- Decker, W.L., Jones, V. and Achutini, R., 1985: The impact of CO<sub>2</sub> incuded climate change on U.S. Agriculture. In Characterization of Information Requirements for Studies of CO<sub>2</sub>-Effects: Water Resources, Agriculture, Fisheries, Forests and Human Health (ed. White M.R.) Wasington D.C., US Dep. of Energy.
- Denness, B., 1984: The climate-energy-economy link. Energy exploration and exploitation. EEE-3, 61-69.
- Detwiler, R., and Hall, C., 1988: Tropical forests and the global carbon cycle. Science 239, 42-47.
- Déri J., 1985: Változások a Duna jégjárásában. Vízügyi Közlemények. 4.
- Dickinson, R. and Cicerone, R., 1986: Future global warming from atmospheric trace gases, Nature 319, 109-115.
- DOE, 1987: Master Index for the Carbon Dioxide Research State-of-the-Art Report Series. US. Dept of Energy, DOE/ER-0316.
- Dunay S., Faragó T. and Nemes Cs., 1988: 1983-1986: years of drought in Hungary. In „Identifying and coping with extreme meteorological events", OMSz, Budapest, 167-204.
- Emanuel, W.R., Shugart, H.H. and Stevenson, M.P., 1985: Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. Climatic Change, 7, 29-43.
- Epstein, E.S., 1982: Detecting climate change. J.Appl. Meteor., 21, 1772-1182.
- Escudero, J.C., 1985: Health, Nutrition, and Human Development in: Climate Impacts Assessment, SCOPE 27, Wiley, 251-272
- Eybergen, F.A., van Huis, J.C., 1988: Climate modeling and the climate sensitivity of biotic and abiotic processes. LICC-project, Report of working phase 1.
- Fairbridge, R.W., 1967: Ice-age theory the encyclopedia of atmospheric sciences and astrology. Reinold Publ. Corp., New York, 462-474.
- Faragó T., 1979: Az éghajlatmodellezés alapjai. OMSz Hiv.Kiadv. XLVIII, 151-161.
- Faragó T., 1981a: Az éghajlatkutatás jelentősége és feladatai. Időjárás, 85, 162-172.
- Faragó T., 1981b: Éghajlat és társadalom. Magyar Tudomány, 7-8, 503-509.
- Faragó T., 1989: Extreme value analysis and some problems of applications in meteorology. OMSz, Budapest.
- Farhar-Pilgrim, B., 1988: Social Analysis In: Climate Impact Assessment, 323-350.
- Fedorov, E.K., 1979: Climatic change and human strategy. Proc.of World Climate Conference, WMO
- Firbás F., 1952: Spat - und nacheiszeitliche Waldgeschichte Mitteleuropas nördlich der Alpen. Veb. G. Fischer Verlag, Jena
- Flohn, H., 1979: A scenario of possible future climates - natural and man-made. Proc. of World Climate Conference, WMO
- Flohn, H., 1980: Possible climatic consequences of a man-made global warming. IIASA, RR-80-30.
- Folland, C.K., Parker,D.E. and Kates F.E., 1984: Worldwide marine temperature fluctuations 1856-1981. Nature, 310, 670-673
- Führer E., Járó Z., 1989: Az éghajlat változékonyságának és feltételezett változásának hatása az erdőállományokra, az erdőgazdálkodásra. ERTI, kézirat
- GARP-Klíma program, 1977: Az éghajlat fizikai alapjai és változásai. A szovjet nemzeti GARP-Klíma program. Moszkva

- Gates, 1985: Modeling as a means of studying the climate system. In: The Potential Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide. US Dept. of Energy., Washington, 57-80.
- Gerle Gy., 1982: Tervszerű környezetfejlesztés. Akadémiai Kiadó, 1982
- Glantz, M.H. and Wigley, T.M.L., 1987: Climatic Variations and their Effects on Water Resources. Resources and Development (eds.: McLaren, D.J. and Skinner, B.J.); S.Bernhard, Dahlen Konferenzen, Wiley, 625-641.
- Glantz, M.H., Brown, B.G., Krenz, M.E., 1988. Societal responses to regional climate change: forecasting by analogy. NCAR, Boulder
- Glantz, M.H., 1989: The case scenario approach to climate related impact analysis. Időjárás, 1, 10-22.
- Gleick, P.H., 1987: Global climatic changes and regional hydrology: impacts and responses. In „Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources" (Eds.: Solom, S.I., Beran, M. and Hogg, W.); IAHS publication, No. 168.
- Global, 1980: The global 2000 report to the President. Washington, U.S. Government Printing Office
- Global 2000, 1982: Report to the President. (A Föld 2000-ben, 1985, Mezőgazdasági K.)
- Golicin G.Sz., 1973: Bevezetés a bolygók légkörének dinamikájába (orosz nyelven) Leningrád, 1973.
- Golicin G.S., 1986: Éghajlatváltozás a XX. és XXI. században. Fizika atmos. i okeana, 22, 12., 1235-1249.
- Götz G., 1977: A Globális Légkörkutató Program. Meteorológiai Tanulmányok, OMSz, 17.
- Götz G., Dévényi D. és Faragó T., 1978: Éghajlatmodellezés és a szubgrid skálájú folyamatok. OMSz, Budapest
- Götz G., 1981: Éghajlati Világprogram - az éghajlatváltozások kutatásának jelentősége, lehetőségei és problémái. MTA X.Oszt. Közl. 14/2-4, 157-175.
- Götz G., 1988: Klímaváltozások és előrejelzésük lehetőségei. Időjárás 92, 140-152.
- Häfele, W. (ed), 1981: Energy in a finite world, 1-2., Ballinger Publ. Co.
- Hameed, S., Cess, R. and Logan, J., 1980: Response of the global climate to changes in atmospheric chemical composition due to fossil fuel burning. J.Geophys. Res., 85, 7537-7545.
- Hameed, S. and Cess, R., 1983: Impact of a global warming on biospheric sources of methane and its climatic consequences. Tellus 35B, 1-7.
- Hanson K., Maul, G.A. and Karl T.R., 1989: Are atmospheric „greenhouse" effects apparent in the climatic record of the contiguous U.S. (1895-1987). Geoph. Res. Letters, 16, 1., 49-52.
- Hayashi, Y., 1982: Confidence intervals of a climatic signal. J. Atm. Sci., 39, 1895-1905.
- Hansen, J., Lacis, A., Rind D., Russel G., Stone P., Fung I., Ruedy R. and Lerner J., 1984: Climate sensitivity: analysis of feedback mechanisms Climate Processes and Climate Sensitivity. Geophys. Monograph 29, vol. 5. 130-163.
- Harnos Zs., 1988: Az éghajlat változékonysága és hatásai a gabonatermesztésre. Vízügyi Közl., 397-408.
- Heathcote, R.L.: Extreme Event Analysis. In: Climate Impact Assessment, 3-36.
- Hock B., 1983: Vízminőség-változási tendenciák vizsgálata. Vízügyi Közlemények, 1.
- Hoffert, M.I. and Flannery, B.P., 1985: Model projections of the time-dependent response to increasing carbon-dioxide. In „Projecting the climate effects of increasing carbon dioxide. (Eds.: M.C. MacCracken, F.M. Luther.); Washington D.C., U.S. Department of Energy

- Holzappel-Pschorn, A. and Seiler, W., 1986: Methane emission during a cultivation from an Italian rice paddy. *J. Geophys. Res.* 91, 11803-11814.
- Hoyt, D.V., 1981: Weather „records" and climatic change. *Clim. Change*, 3, 243-249.
- Időjárás, 1988: A környezet regionális és globális változásai. *Időjárás* 92, 2-3.sz.
- Idso, S.B., 1980: The climatological significance of a doubling of Earth's atmospheric carbon dioxide concentration. *Science*, 207, 1462-1463.
- Idso, S.B., Brazel, A.J., 1984: Rising atmospheric carbon dioxide concentrations may increase streamflow. *Nature*, 312.
- IIASA, 1976: Second Status Report of the IIASA project on Energy Systems.
- Izrael, Y.A., 1983: Integrated global monitoring of climate and the environment. WMO, No.614, 60-78.
- Járó Z., 1972: Az erdészeti termőhelyértékelés rendszere. Danszky I.: Erdőművelés; Mezőgazdasági Könyvkiadó, 46-87.
- Jászay T., 1989: CO<sub>2</sub>-emission study, Hungary. Budapesti Műszaki Egyetem, kézirat
- Jones, P.D., et al., 1986: Northern Hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984. *J.Clim.Appl.Meteor.*, 25, 161-179.
- Jones, P.D., Wigley, T.M.L., and Wright, P.B., 1986 : Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature* 322, 430-434.
- Jones, P.D., Wigley, T.M.L., Folland C.K., Parker, D.E., Angell, J.K., Lebedeff, S. and Hansen, J.E., 1988: Evidence for global warming in the past decade. *Nature* 332, 790.
- Jäger, J. and Kellogg, W.W., 1983: Anomalies in temperature and rainfall during warm Arctic seasons. *Climatic Change*, 5, 39-60.
- Jäger, J., 1983: Climatic and energy systems. A review of their interactions. Wiley (IIASA)
- Karl, T.R., 1986: Relationship between decreased temperature range and precipitation trends in the United States and Canada, 1941-80. *J.Climate Appl. Meteor.* 25, 1878-1886.
- Karl, T.R., H.F. Diaz and G. Kukla, 1988: Urbanization: its detection and effect in the United States Climate record. *J.Climate*, 11, 1099-1123.
- Karl, T.R., 1988: Multi-year fluctuations of temperature and precipitation: a gray area of climate change. *Climatic Change*, 12, 179-197.
- Karol, I.L., (ed.), 1986: A légkör sugárzási-fotokémiai modelljei. Leningrád, 92 pp.
- Kates, R.W., Ausubel, J.H., Berberian, M. (eds.), 1985: Climate Impact Assessment. Wiley, SCOPE 27, New York
- Kates, R.W., 1985: The Interaction of Climate and Society In: Climate Impact Assessment, 511-528.
- Katz, R.W., 1977: Assessing the impact of climate change on food production. *Climate Change*, 1., 85.
- Katz, R.W., 1979: Sensitivity Analysis of statistical Crop-Weather Models. *Agricul. Met.*, 20, 291-300.
- Katz, R.W., 1988: Statistical properties for making inferences about climate variability. *J.Climate*, 1, 1057-1064.
- Katz, R.W., 1989: Climate change for extreme events: an application of the theory of extreme values. 11th Conf. „Probability and statistics in Atmos. Sciences", Monterey.
- Kavanaugh, M., 1987: Estimates of future CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emissions from energy combustion.. *Atmosph. Environment* 21, 463-468.
- Kellogg, W.W., 1977: Effects of human activities on climate. WMO Techn. Note, No. 156, WMO, Geneva
- Kellogg, W.W. and Schwart, R., 1983: Society, science and climate change. *Dialogue*, No. 61, (USA) 3/1983, 62-69.

- Kellogg, W.W. and Schwart, R., 1982: Society, Science and climate change. Foreign Affairs, 1076-1109.
- Kellogg, W.W., 1987: Human impact on climate: the evolution of an awareness. Climatic Change, 10, 113-136.
- Kienitz G., 1967: Az 1966. évi tavaszi belvíz hidrológiai értékelése. Vízügyi Közlemények. 1.
- Kitano Y. et al.(eds.), 1988: Policy recommendations concerning climate change. Environment Agency, Japan
- Koflanovits E., 1974: Hosszú csapadéksorok trendjének elemzése Európa területén. Időjárás, 78, 88-96.
- Koflanovits E., 1977: A csapadékmennyiség változékonyságának elemzése Közép-Európában. OMSz Kisebbségi Kiadványai, 42., Budapest.
- Kordos L., 1977: Changes in the Holocene climate of Hungary reflected by the „völvethermometer” method. Földrajzi Közlemények, XXV., 1-3, 222-229.
- Kordos L., 1979: A paleoklimatológiai kutatások módszerei és eredményei Magyarországon. Budapest.
- Kovács Gy., Csermák B. és Dávid L., 1983: A vízgazdálkodás távlati fejlesztésének prognózisa. VIZDOK VMGT 143.
- Kontur I., 1979: Balaton természetes vízkészletváltozásai idősorának elemzése. Országos Vándorgyűlés, Keszthely.
- Kontur I., 1985: A talajvízállás hosszú idejű előrejelzése. Hidrológiai Közlemény, 6.
- Kovács D. és Károlyi Z., 1977: A magyar-jugoszláv közös érdekeltségű Duna-szakasz jégjárásváltozásának vizsgálata. Vízügyi Közlemények, 3.
- Kovács G., 1989: Globális és nagyterületi éghajlati változások társadalmi-gazdasági hatásainak stratégiai tervezési és kormányzati döntési összefüggései. MKKE, Jövő kutatás és Tervezés Tanszék, kézirat
- Kovuneva, N.P., 1984: Zakonomnostonnyi szovremennih izmenenij po lej prizemnoj temperaturi vozduha i atmosferyh oszadkov. Izv. AN SzSzSzR, Szer. Geograf. No.6., 29-39.
- Krall F., 1989: Pollenanalytische Untersuchungen zur jüngeren Würdegeschichte des Rösengebirges (Niederösterreich) Centralblatt für das gesamte Forstwesen 106, 3., 149-160.
- Kristoferson, L., 1988: Energy and environment - how to implement sustainable futures. In „Perspectives of sustainable development”, Stockholm, No.1, 91-99.
- Landsberg, H.E., 1979: Climatic fluctuations. In „Yearbook. Science and Technology”, McGraw Hill
- Láng I., Csete L. és Harnos Zs., 1983: A magyar mezőgazdaság agroökológiai potenciálja az ezredfordulón. Mezőg. Kiadó, Budapest.
- Láng I. (szerk.), 1985: A biomassza komplex hasznosításának lehetőségei. Mezőg. Kiadó, Budapest.
- Linder, K., 1989: Electricity demand. EPA Journal, 15, No.1, 17-18.
- Livezey, R.E., 1985: Statistical analysis of general circulation model climate simulation: sensitivity and prediction experiments. J. Atm. Sci., 42, 1139-1149.
- Lorenz, E.N., 1968: Climate determinism. Meteor. Monographs, 8, No.30, 1-3.
- Lough, J.M., Wigley, T.M.L. and Paulikson, J.P., 1983: Climate and Climate Impact Scenarios for Europe in a Warmer Earth. J. Climate and Applied Met., 1673-1684.
- Lovász Gy., 1986: A lefolyás tendenciái a Duna nagymarosi szelvényében 1883-1980. között. Földrajzi Értesítő, 1-2.



- Madden R.A. and V.Ramanathan, 1980: Detecting climate change due to increasing carbon dioxide. *Science*, 209, No.4458, 763-768.
- Major P. és Vargay Z., 1983: A talajvíz alakulása a Kiskörei-tározó térségében. *Vízügyi közlemények*.
- Manabe, S. and Wetherald, R.T., 1980: On the distribution of climate change resulting from an increase in CO<sub>2</sub> content of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.* 37, 99-118.
- Manne, A.S. and Schrattenholzer, L., 1987: International Energy Workshop: A Progress Report IIASA. RR-87-2. February 1987.
- Mason, B.J., 1976: Towards the understanding and prediction of climatic variations. *Quart.J. Royal Met.Soc.*, 102, No.433, 473-498.
- McDonald, 1981: Energy in a Finite World. Report by the Energy Systems Program Group of the IIASA. Executive Report, No.4.
- Mearns, L.O. et al., 1984: Extreme high-temperature events: changes in their probabilities with changes in mean temperature. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 23, 1601-1603.
- Mearns L.O., S.H. Schneider, S.L. Thompson, L.R. McDaniel, 1988: Climate variability statistics from general circulation models as applied to climate change analysis. Meeting on „Development of regional climate scenarios". IIASA.
- Mensel, H., Jäger, E. and Weinert, E., 1968: *Vergleichende Chronologie der Zentraleuropäischen Flora*. Gustav Fischer Verlag, Jena
- Mészáros E., 1977: *A levegőkémia alapjai*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Mészáros E., Major Gy., Horváth L., 1984: A fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának hatása a légkör összetételére, savasodására és hőszennyeződésére. *Időjárás*, 88, 5-6, 339-342.
- Mészáros E., 1988: A légkör összetételének jelenkori változásai. *Időjárás*, 92, 101-109.
- Mika J., 1979: Egy kapcsolt óceán-légkör modell éghajlat-elméleti vizsgálata.
- Mika J., 1981: A globális éghajlat statisztikai-dinamikai modellezése. *MTA-Közl.* 14, 2-4 sz., 177-192.
- Mika J., 1983: *Elméleti éghajlattan*. Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Budapest.
- Mika J., 1986: Magyarország 2020: Éghajlat (Globális felmelegedés, helyi következmények) Tanulmány a MKKE Nép gazdasági Tervezési Intézetben készült OT távlati koncepcióhoz, 106 o.
- Mika J., 1987: A meteorológiai elemek évi menetének felhasználása a globális klímaváltozás regionális sajátosságainak becslésére. *Időjárás*, 91, 34-42.
- Mika J., 1988: A globális felmelegedés regionális sajátosságai a Kárpát-medencében. *Időjárás* 92, 178-189.
- Mika J., 1989: Estimation of the relative sensitivity of regional climate as compared to global changes. In: *IGU Conference on Climatic Change in the Historical and the Instrumental Data*
- Mitchell, J.F.B., 1983: The seasonal response of a general circulation model to changes in CO<sub>2</sub> and sea temperature. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 109.
- Mobley, C.D., R.W. Preisendorfer, 1985: Statistical analysis of historical climate data series. *J.Climate Appl. Meteor.*, 24, 555-567.
- MTA, 1981: Az éghajlat változásának és változékonyságának elméleti kérdései. Az éghajlat és az emberi tevékenység kapcsolata. „Az MTA Föld és Bányászati Tudományok Osztálya közleményei", 157-326.
- NDU, 1978: Climate change to the year 2000. A survey of expert opinion. *Nat. Defense Univ.*
- Nemec, J., 1982: Sensitivity of Water Resource Systems to Climate Variation. *Hydrological Sciences Journal*, 27.

- North, G.R., Cahalan, R.F. and Coakley, J.A., 1981: Energy balance climate models. Rev. of Geoph. and Space Physics, Vol. 19.
- Nováky B., 1985: A lefolyás éghajlati adottságai a Zagyva-Tarna vízrendszerben. Vízügyi Közlemények, 1.
- Nováky, B., Pachner, C., Szesztay, K. and Miller, D., 1985: Water resources. In „Climate Impact Assessment” (eds. R.W. Kates, J.H. Ausubel, M. Berberian. Wiley), SCOPE 27, New York
- Nováky B., 1988: Az évi lefolyás változékonyságának függése az éghajlati elemektől. Hidrológiai Közlöny, 4.
- Nováky B., 1989a: Climatic effects on the runoff conditions in Hungary. Paper prepared for the LICC-conference.
- Nováky B., 1989b: Gondolatok a globális éghajlati változások kapcsán. Magyar Vízgazdálkodás, 5.
- Nováky B., 1989c: Az éghajlati változékonyság és az éghajlatfeltételezett változásának hatása a vízjárásra és a vízgazdálkodásra. VITUKI, kézirat
- Nováky E., 1987: Egy magyar környezetvédelmi modell kidolgozásának tapasztalatai. KGST-tanulmány, MTA DTI
- Nováky E., 1987: A társadalom mint komplex rendszer előrejelezhetősége. SzEKI, Budapest.
- Nováky E., 1988: Társadalmi-gazdasági fejlődés és a környezeti változások előrejelzése. „A környezetvédelem prognosztizálásának magyarországi eredményei a KGST-együttműködésben”, Környezetvédelmi tanulmányok, 8.
- Nováky E. és Kovács A., 1989: Védelmi ágazatok, konfliktusok és a társadalmi fejlődés. MKKE Egyetemi Szemle, 4.
- Nováky E., 1989a: Társadalmi-gazdasági fejlődés és a környezet állapota „Prognosztizálás, tervezés, modellezés a környezetvédelemben”, KVM (megjelenés alatt)
- Nováky E., 1989b: Az éghajlat változékonyságának és feltételezett változásának társadalmi-gazdasági összefüggései. MKKE, Jövőkutatás és Tervezés Tanszék, kézirat
- Olejnik, J., 1988: Present and future estimates of evapotranspiration and runoff for Europe, Working Paper WP-88-037. IIASA, Laxenburg, Austria
- Oram, P.A., 1985: Sensitivity of agricultural production to climatic change, 7, 129-152.
- Paál T., 1984: A budapesti talajvízállás trend vizsgálata. Hidrológiai Közlöny, 4.
- Palutikof, J.P., 1987: Some possible impacts of greenhouse gas induced climatic change on water resources in England and Wales. In „The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources” (eds. S.I. Solomon, M. Beran, W. Hogg), IAHS Publ., No. 168
- Parry, M.L., Carter, T.R., 1983: Assessing Impacts of Climatic Change in Marginal Areas: The Search for an Appropriate Methodology. IIASA Working Paper WP-83-77.
- Parry, M. (ed.), 1985: The sensitivity of natural ecosystems and agriculture to climatic change. IIASA, RR-85-1
- Parry, M.L., T.R. Carter, 1985: The effect of climatic variations on agricultural risk. Climate Change, 7, 95-110.
- Parry, M.L., Carter, T.R. and Konijn, N.T., 1988: The Impact of Climatic Variations on Agriculture Vols I-II Kluwer Academic Publ., Dordrecht, Boston, London.
- Pálvölgyi T., 1985: Havi bontású nulla-dimenziós energiaegyensúlyi éghajlat modell. Időjárás, 89, 228-241.
- Pálvölgyi T., 1988: Az óceán és a tengeri jég szerepe az éghajlat antropogén eredetű módosulásában. Időjárás, 92, 163-176.

- Pálvölgyi T., Práger T., 1987: Simulation of decal scale climatic changes by monthly resolution EBM. (Submitted to Tellus)
- Petrasovits I., 1987: Vízgazdálkodás, melioráció, agrometeorológia. Időjárás, 91, 160-166.
- Petrasovits I., 1989: Az éghajlat változékonyságának és fel- tételezett változásának hatása a mezőgazdaságra, különösen a növénytermesztésre. Gödöllői Agrártudományi Egyetem, kézirat
- Péczely Gy., 1973: Éghajlatunk múltja és jövője. Légkör, 4.
- Pittock, A.B. and Salinger, J.M., 1982: Towards regional scenarios for a CO<sub>2</sub>-warmed Earth Climatic Change 4, 23-40.
- Polgár Gy., 1966: A belvízjárás és a napfolttevékenységek kapcsolata. Vízügyi Közlemények, 1.
- Poljak, I.I., 1985: „Jel plusz zaj” modellek és az idősorok területi átlagolása (orosz nyelven). Meteorologija i Hidrologija, 9., 46-53.
- Práger T., Kovács E., 1988: A légköri nyomgázok és aeroszol részecskék éghajlatmódosító hatásának vizsgálata sugárzási-konvektív modellel. Időjárás, 92, 153-162
- Priestly, C.H.B., 1959: Turbulent transfer in the lower atmosphere. Univ. of Chicago.
- Probáld F., 1981: Változik-e az éghajlatunk? Gondolat, Budapest
- Ramanathan, V., 1981: The role of ocean-atmosphere interactions in the CO<sub>2</sub> climate problem J. Geophys. Res. 38, 918-930.
- Ramanathan, V., Singh, H.B., Cicerone, R.J. and Kiehl, J.T., 1985: Trace gas trends and their potential role in climate change. J. Geophys. Res. 90, 5547-5566.
- Ratkovics, D.J., 1976: Mnogolétnyje kolebányie recsnovo sztoka. Gidrometeoizdat, Leningrad.
- Réthy A., 1962, 1970: Időjárási események és elemi csapások Magyarországon I (-1700), II (1701-1780), Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Robinson, J.: Global Modeling and Simulations. „Prognosztizálás, tervezés, modellezés a környezetvédelemben”, KVM, 1989. (megjelenés alatt)
- Rosenberg, N.J., 1981: The increasing CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere and the implication on agricultural productivity. Climatic Change, 3, 265-280.
- Rotty, R.M., 1987: Estimates of seasonal variation in fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions. Tellus 39B, 184-202.
- Saltzman, B., 1978: A survey of statistical-dynamical models of terrestrial climate. Advances in Geophysics, Vol.20.
- Samuelson, P.A., 1976: Közgazdaságtan. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó.
- Schaake, J.C., Kaczmarek, Z., 1979: Climate variability and the design of water resource systems. World Climate Conf., Overview Paper, 12, WMO, Geneva
- Scheuer Gy., Aujeszký G., Kraft S., 1985: A pécsi Tettye karsztforrás hozamjárásának összefüggése a csapadékviszonyokkal. Hidrológiai Közlöny, 2.
- Schneider, S.H. and Dickinson, R.E., 1974: Climate modeling. Rev. of Geoph. and Space Sci., Vol. 12.
- Schönwiese, Ch. D., 1989: Detecting the anthropogenic greenhouse effect. IGU Conference on „Climatic Change in the Historical and Instrumental Periods” (ed. Brádíl, R.), Brno, (In press)
- Siegenthaler, U., 1984: 19th century measurements of atmospheric CO<sub>2</sub>: A comment. Climatic Change 6, 409-412.
- Simmons, A.J. and Bengtsson, L., 1984: Általános cirkulációs modellek: Céljaik és a klímakutatásban való használatuk (angol nyelven). In: The Global Climate (ed. J.T. Houghton), Cambridge Univ. Press, pp. 94-149.

- Simonné, M., 1984: A Maros folyó vízjárástörténeti jellegzetessége. Hidrológiai Közlöny, 3.
- Smit, B., 1989: Climate warming and Canada's comparative position in agriculture. CDD-89-01.
- Solow, A.W., 1987: Testing for climate change: an application of the two-please regression model. J. Climate Appl. Meteor., 1401-1405.
- Stewart, R.B. et al., 1988: Estimating effects of climatic change on agriculture in Saskatchewan, Canada. CDD-88-06.
- Szalai S., 1989: Az északi-félgömb kétdimenziós éghajlati modellje. Időjárás, 2-3.
- Szász G., 1981: A légköri széndioxid változásának hatása a növények produktivására. Föld és Bányászati Tud.Oszt. Közl., 14, 2-4., 277-292.
- Szász G., 1987: The role of climate in the intensive development of agriculture. Conf. on Climatic changes, Brno, 43-56.
- Szentimrey T., Gulyás O., 1986: Iterative Method for the Periodical Analysis of long time series. Third International Conference on Statistical Climatology, Vienna.
- Szentimrey T., 1989: A lineáris analitikus trendvizsgálat néhány elvi-módszertani kérdése. Időjárás, 2-3., 151-156.
- Szesztay K., 1962: A Balaton vízháztartása. VITUKI, Tanulmányok és Kutatási eredmények, 9.
- Szesztay K., 1963: Hidrológia. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Szesztay K., 1981: The Role of Water in the Climate Formation Processes. Toronto meeting of the SCOPE/ISCIS programme.
- Szesztay K., 1982: River basin development and water management. Water Quality Bulletin, WHO, 7.
- Szilágyi J., 1989: Antropogén klímaváltozás hatása egy víztározó teljesítőképességére. Vízügyi Közlemények, 2.
- Tárányi Zs., 1979: Meteorológia és energia. Légkör. 3, 11-18.
- Tárányi Zs. és Ambrózy P., 1984: A légköri erőforrások szerepe az energiagazdálkodásban. OMSz Hiv. Kiadv. LVII, 43-54.
- Ubell K., 1959: Talajvízháztartás és jelentősége Magyarország vízgazdálkodásában. Vízügyi Közlemények, 2.
- UNESCO, 1982: Climate, chemistry and physics of the atmosphere. Impact, 32, No.3, Paris
- Vágas I., 1982: A Tisza árvizei. Budapest.
- Varga-Haszonits Z., 1987: Agrometeorológiai információk és hasznosításuk. Mezőgazdasági kiadó.
- Vinnikov, K.J., Grojszman P. J., 1979: Empiricseszkaja model szovremennüh izmenyenyij klímata. Meteor i Gidrol., 3. 30-40.
- Vinnikov, K Ja, 1986: Csuvstvitelnosztj klímata. Gidrometeoizdat, Leningrád, 219 o.
- Vinnikov, K. Ya. et al., 1987: Az Északi Hemiszféra középhőmérsékletének változása 1841-1985 között. (orosz nyelven). Meteor.i Gidrol., 1, 45-55.
- VITUKI, 1982: A Balaton-vízgyűjtő vízi környezeti állapota 1971-1980. Vízirajzi Intézet. Kézirat
- VITUKI, 1988: A mértékadó árvízszintek meghatározási módszerének fejlesztése. Jelentés.
- VITUKI, 1989: Az éghajlati változékonyság és feltételezett változásának hatása a vízjárásra és a vízgazdálkodásra. Jelentés
- WCC, 1979: Proceedings of the World Climate Conference, Geneva
- WCP, 1982: Report of the WMO/ICSU Study Conference on physical basis for climate prediction. WCP-38

- Webb, T., Wigley, T.M.L., 1985: What Past Climates Can Indicate about a Warmer World. In: „The Potential Climatic Effects of Increasing Carbon Dioxide", US Dept. of Energy, Washington
- Webster, P.J. and Stephens, G.L., 1984: A felhőzet és a sugárzás kapcsolata, valamint az éghajlat kérdései (angol nyelven). In: The Global Climate (ed. J.T. Houghton), Cambridge Univ. Press, pp. 150-182.
- Wexler, H., 1955: Possible causes of climatic fluctuations. In „Dynamics of climate" (ed, R.L. Pfeffer). Pergamon Press.
- Wigley T.M.L., P.D. Jones, 1981: Detecting CO<sub>2</sub>-induced climatic change. *Nature*, 292, 205-208.
- Wigley, T.M.L., Jones, P.D., 1985: Influence of precipitation changes and direct effects CO<sub>2</sub> effects on streamflow. *Nature* 314.
- Williams, J. (ed.), 1978: Carbon dioxide, climate and society. Proc. IIASA Workshop, Laxenburg
- Williams, J., 1980: Anomalies in temperature and rainfall during warm Arctic seasons as a guide to the formulation of climate scenarios. *Climate Change* 2, 249-266.
- Williams, G.D.V., 1985: Estimated Bioresource Sensitivity of Climatic Change in Atalanta, Canada. *Climatic Change*, 7, No. 1., 55-68.
- Wilson, C. and Mitchell J.F., 1987: A doubled CO<sub>2</sub> climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean model. *J. Geophys Res.* 92, 13315-13343.
- Wittwer, S.H., 1980: Carbon dioxide and climatic change: an agricultural perspective. *J. Soil and Water Conservation.* 35, 116-120.